

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

На правах рукописи

ШВЕЦОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**РЕЗОНАТОРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ
ВОЛНАХ В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
БЕСПРОВОДНЫХ ПАССИВНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Специальность 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., с.н.с.

Жгун Сергей Александрович

МОСКВА - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	9
Глава 1. ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ	16
1.1. Системы измерения температуры с датчиками на ПАВ	11
1.2. Методы и устройства опроса датчиков на ПАВ	20
1.3. Конструкция чувствительных элементов на ПАВ	26
1.4. Материалы для чувствительных элементов на ПАВ	28
1.5. Примеры конструкции антенн датчиков на ПАВ	32
1.6. Применения датчиков	34
1.7. Выводы по главе 1	35
Глава 2. СОГЛАСОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА НА ПАВ С РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ ТРАКТОМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОПРОСЕ ДАТЧИКА	38
2.1. Методы расчета энергии переизлученного сигнала	38
2.2. Зависимость накопленной энергии от параметров радиотехнического тракта и резонатора	44
2.3. Зависимость энергии излученного датчиком сигнала от параметров радиотехнического тракта и резонатора	52
2.4. Зависимость эффективности переизлучения энергии от параметров радиотехнического тракта и резонатора	58
2.5. Сравнение результатов приближенного расчета и численного расчета	64
2.6. Выводы по главе 2	68
Глава 3. ВЫБОР ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ	71
3.1. Связь параметров резонаторов на ПАВ с характеристиками ПАВ	71
3.2. Исследуемые подложки и типы волн	76
3.3. Параметры ПАВ на подложках из кварца	78
3.3.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из кварца	78
3.3.2. Подложки из кварца с максимальным и минимальным ТКЗ	80
3.3.3. Области ориентации подложек из кварца с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС	83
3.3.4. Срезы кварца для использования единой подложки для пары резонаторов	84
3.3.5. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из кварца	86

3.4. Параметры ПАВ на подложках из лангасита	89
3.4.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из лангасита	89
3.4.2. Подложки из лангасита с максимальным и минимальным ТКЗ	91
3.4.3. Области ориентации подложек из лангасита с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС	94
3.4.4. Срезы лангасита для использования единой подложки для пары резонаторов	94
3.4.5. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из лангасита	95
3.5. Параметры ПАВ на подложках из танталата лития	98
3.5.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из танталата лития	98
3.5.2. Области ориентации подложек из танталата лития с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС	100
3.5.3. Срезы танталата лития для использования единой подложки для пары резонаторов	100
3.5.4. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из танталата лития	101
3.6. Параметры ПАВ на подложках из ниобата лития	103
3.6.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из ниобата лития	103
3.6.2. Области ориентации подложек из ниобата лития с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС	105
3.6.3. Срезы ниобата лития для использования единой подложки для пары резонаторов	106
3.6.4. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из ниобата лития	107
3.7. Сравнительный анализ различных материалов подложки	109
3.7.1. Зависимость максимальной разницы ТКЗ пары ПАВ на единой подложке от требуемого значения КЭМС	109
3.7.2. Зависимость максимальной разницы ТКЗ пары ПАВ на разных подложках от требуемого значения КЭМС	111
3.8. Выводы по главе 3	115
Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ НА ПАВ	
НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ КВАРЦА И ЛАНГАСИТА	118
4.1. Ориентация подложек из кварца и конструкции резонаторов	118
4.2. Результаты измерения характеристик резонаторов на 70°Y-срезе кварца	121
4.3. Результаты измерения характеристик резонаторов на других срезах кварца	125

4.4. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений ТКЧ	130
4.5. Добротность и коэффициент связи экспериментально исследованных резонаторов	133
4.6. Варьирование направления распространения квази-рэлеевской ПАВ на $70^\circ Y$ -срезе кварца	136
4.7. Резонаторы на подложках из лангасита для высокотемпературных датчиков	138
4.8. Выводы по главе 4	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	152
ПРИЛОЖЕНИЯ	161
Приложение 1. Акты об использовании результатов диссертации	161
Приложение 2. Результаты расчета параметров ПАВ	163

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Аббревиатуры

- ВГБ — волна Гуляева – Блюштейна
 ВШП — встречно-штыревой преобразователь
 КЭМС — коэффициент электромеханической связи
 ЛЗ — линия задержки
 ЛЧМ — линейно частотно-модулированный
 ОАВ — объемная акустическая волна
 ОЛЗ — отражательная линия задержки
 ОР — отражающая решетка
 ПАВ — поверхностная акустическая волна
 ПВР — пьезоактивная волна Рэлея
 ТКЗ — температурный коэффициент задержки
 ТКЛР — температурный коэффициент линейного расширения
 ТКЧ — температурный коэффициент частоты
 ЧМ — частотно-модулированный

Условные обозначения

- C_S — статическая емкость схемы замещения резонатора на ПАВ
 C — динамическая емкость схемы замещения резонатора на ПАВ
 L — динамическая индуктивность схемы замещения резонатора на ПАВ
 r — сопротивление резонатора на ПАВ на частоте последовательного резонанса
 Z_A — входной импеданс радиотехнического тракта
 R_A — входное сопротивление радиотехнического тракта
 X_A — реактивная часть входного импеданса радиотехнического тракта
 e — ЭДС эквивалентного источника сигнала
 E_I — амплитуда опрашивающего сигнала
 f_I — частота опрашивающего сигнала
 φ_I — фаза опрашивающего сигнала
 t — время

f_r	— частота последовательного резонанса (резонансная частота)
ω_r	— циклическая частота последовательного резонанса
Q	— добротность
K_c	— коэффициент связи
f_a	— частота параллельного резонанса (антирезонансная частота)
R	— сопротивление резонатора на ПАВ на частоте параллельного резонанса
W_S	— среднее значение энергии, запасенной в статической емкости
W_C	— среднее значение энергии, запасенной в динамической емкости
W_L	— среднее значение энергии, запасенной в динамической индуктивности
I	— амплитуда тока в динамической ветви схемы замещения резонатора на ПАВ
U_C	— амплитуда напряжения на динамической емкости
U	— амплитуда напряжения, приложенного к резонатору на ПАВ
Y_m	— проводимость динамической ветви схемы замещения резонатора на ПАВ
ω	— циклическая частота
ξ	— расстройка
W	— среднее значение энергии, запасенной в резонаторе на ПАВ
F	— нормированная частота
R_N	— входное сопротивление радиотехнического тракта, отнесенное к r
R_n	— нормированное входное сопротивление радиотехнического тракта
f_W	— оптимальная частота опрашивающего сигнала
F_W	— оптимальная нормированная частота опрашивающего сигнала
ξ_W	— оптимальная расстройка
W_{\max}	— среднее значение энергии, запасенной в резонаторе на ПАВ при оптимальной частоте опрашивающего сигнала
W_{\lim}	— среднее значение энергии, запасенной в резонаторе на ПАВ при согласовании импеданса радиотехнического тракта и импеданса резонатора на ПАВ
P_{\lim}	— мощность, передаваемая в резонатор на ПАВ при согласовании импеданса радиотехнического тракта и импеданса резонатора на ПАВ
η_W	— показатель эффективности накопления энергии
Δ_R	— сумма R_n и единицы, деленной на R_n
δ_R	— параметр Δ_R , отнесенный к $K_c Q$
R_W	— наибольшее из значений R_n , при которых η_W максимален
u_C	— напряжение, приложенное к динамической емкости
u_L	— напряжение, приложенное к динамической индуктивности

u_r	— напряжение, приложенное к сопротивлению потерь
u	— напряжение, приложенное к резонатору на ПАВ
τ	— нормированное время
$\tilde{\omega}$	— нормированная частота свободных колебаний
$\tilde{\alpha}$	— нормированный показатель затухания свободных колебаний
$\tilde{\varepsilon}$	— нормированный показатель затухания аperiodического решения уравнения свободных колебаний
A	— амплитуда свободных колебаний
φ_A	— фаза свободных колебаний
A_e	— амплитуда аperiodического решения уравнения свободных колебаний
E_A	— энергия свободных колебаний, рассеиваемая на входном сопротивлении радиотехнического тракта
η_E	— КПД излучения энергии
η	— показатель эффективности переизлучения энергии
η_{\max}	— максимально возможное значение η
δ_{\max}	— значение δ_R , при котором $\eta = \eta_{\max}$
η_m	— максимальное значение η
R_{\max}	— наибольшее из значений R_n , при которых η максимален
Δt	— шаг дискретизации по времени
Δf	— шаг дискретизации по частоте
Y	— адмитанс резонатора на ПАВ
T_{CF}	— температурный коэффициент частоты резонатора на ПАВ
T_{CD}	— температурный коэффициент задержки ПАВ
ζ	— коэффициент преобразования электрической энергии в механическую
p_{IDT}	— период ВШП
C_{IDT}	— статическая емкость ВШП, отнесенная к его длине
η_{ef}	— коэффициент формы ВШП
K_{eff}^2	— эффективный КЭМС для периодической структуры
K^2	— коэффициент электромеханической связи
M	— коэффициент металлизации
λ	— длина волны ПАВ
h_{IDT}	— толщина электродов ВШП
h_n	— толщина электродов ВШП, отнесенная к периоду ВШП
h	— толщина слоя
PFA	— угол отклонения потока энергии

- φ — первый угол Эйлера
 θ — второй угол Эйлера
 ψ — третий угол Эйлера
 γ — параметр дифракции
 V — скорость ПАВ
 C_{ij} — компоненты тензора упругости
 Δ_{TCF} — разность ТКЧ пары резонаторов, изготовленных на одной подложке
 TC_{\max} — максимальный ТКЗ
 TC_{\min} — минимальный ТКЗ
 K_{\min}^2 — минимальный требуемый КЭМС
 Δ_{\max} — максимальная разность ТКЧ пары резонаторов, изготовленных на одной подложке
 ψ_{\min} — третий угол Эйлера, соответствующий направлению распространения ПАВ с минимальным ТКЗ
 ψ_{\max} — третий угол Эйлера, соответствующий направлению распространения ПАВ с максимальным ТКЗ
 \tilde{K}_c — эффективный коэффициент связи
 n_R — количество электродов в ОР
 n_{IDT} — количество электродов в ВШП
 d_R — шаг электродов ОР
 d_{IDT} — шаг электродов ВШП
 d — зазор между ВШП и ОР
 w — апертура ВШП
 R_{el} — коэффициент отражения ПАВ от электрода ОР
 Y_r — адмитанс резонатора на ПАВ на частоте последовательного резонанса

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В современных условиях все большее распространение получают системы телеметрии. Для таких систем необходимы датчики, среди которых наиболее востребованы пассивные (без автономных элементов питания непосредственно в датчике, размещенном на объекте), информация с которых передается посредством электромагнитных волн. Такие датчики могут опрашиваться при отсутствии прямой видимости между датчиком и опрашивающим устройством и способны работать в широком диапазоне температур и давлений, в присутствии механических нагрузок, магнитных полей, ионизирующих излучений, под неблагоприятными воздействиями окружающей среды.

Этим требованиям хорошо отвечают датчики, чувствительными элементами которых являются устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Радиотехнические устройства данного типа могут совмещать функции датчика и устройства радиочастотной идентификации (РЧИД). Чувствительные элементы датчиков на ПАВ и РЧИД на ПАВ можно разделить на две основные группы: устройства на основе линий задержки на ПАВ и устройства на основе резонаторов на ПАВ. Первые обладают большими возможностями для реализации функций РЧИД, вторые позволяют получить меньшие габариты устройства, большую точность измерений и дальность действия системы телеметрии.

Для одновременного беспроводного опроса множества датчиков с чувствительными элементами на основе резонаторов на ПАВ применяется частотное разделение. В этом случае для каждого из них частота сигнала, посредством которого опрашивается датчик, и частота сигнала, который излучает датчик, находится в своем диапазоне частот (рабочем диапазоне частот данного резонатора на ПАВ). Сумма ширины рабочих диапазонов частот всех резонаторов на ПАВ не превышает ширину рабочего диапазона частот системы. С другой стороны, ширина рабочего диапазона отдельного резонатора на ПАВ определяется его температурным коэффициентом частоты (ТКЧ) и диапазоном измеряемых температур. В итоге, предпочтительное значение ТКЧ может быть различным в зависимости от диапазона измеряемых температур, количества опрашиваемых резонаторов на ПАВ и ширины рабочего диапазона частот системы.

Структура рассматриваемой системы телеметрии схематично изображена на рис. 1. Опрашивающее устройство излучает опрашивающий сигнал. Для опроса датчиков с резонаторами на ПАВ используются радиоимпульсы прямоугольной формы с несущей частотой, близкой к резонансной частоте одного из резонаторов на ПАВ. После окончания опрашивающего импульса в опрашиваемом резонаторе на ПАВ происходят экспоненциально

затухающие свободные колебания (свободные колебания в других резонаторах имеют намного меньшую амплитуду за счет большего отличия их резонансных частот от частоты опрашивающего сигнала). Приемник включается через некоторое время после окончания опрашивающего импульса (достаточное для того, чтобы на опрашивающее устройство перестал действовать отраженный от окружающих предметов сигнал) и принимает сигнал в период времени, в течение которого свободные колебания имеют амплитуду, превышающую определенный уровень.

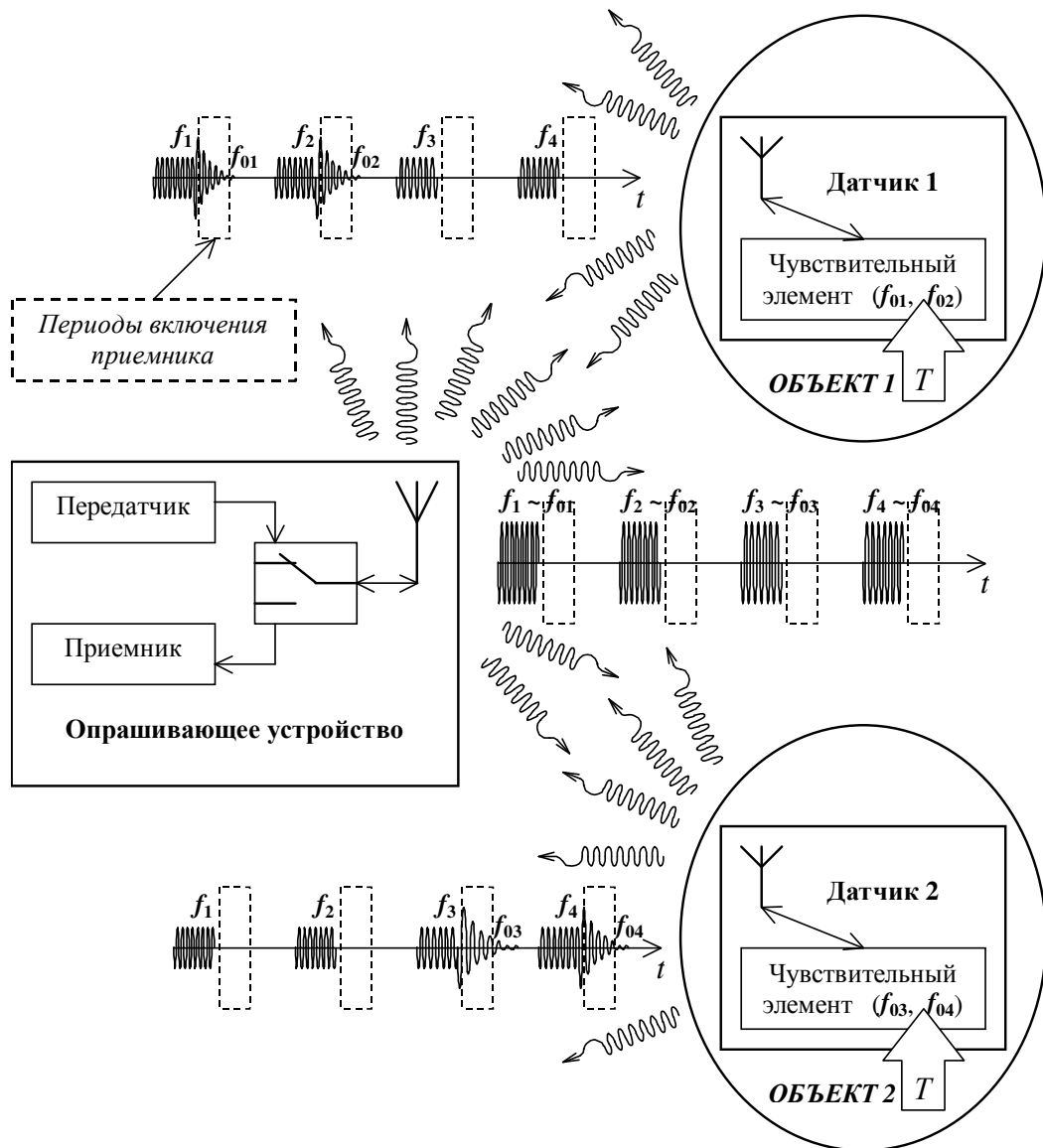


Рис.1. Система телеметрии с датчиками с резонаторами на ПАВ.

Опрос производится в несколько этапов. На каждом последующем этапе частота опрашивающего сигнала ближе к резонансной частоте опрашиваемого резонатора на ПАВ, чем на предыдущем. Это позволяет увеличить энергию, запасенную в резонаторе на ПАВ за время действия опрашивающего импульса, и, следовательно, получить отклик большей амплитуды и более точно измерить его частоту. Длительность опрашивающих импульсов близка к

длительности переходного процесса в резонаторе на ПАВ. На последнем этапе применяется опрос серий импульсов с одинаковой несущей частотой.

Наиболее распространенным методом обработки отклика является преобразование Фурье и определение частоты, на которой модуль спектральной плотности отклика максимален.

Чувствительный элемент каждого датчика состоит из пары резонаторов на ПАВ с различным ТКЧ. Температура объекта, на котором находится датчик, определяет температуру резонаторов на ПАВ и, соответственно, частоту свободных колебаний каждого из них. Температура определяется по разности частоты свободных колебаний одного и другого резонатора на ПАВ. Использование пары резонаторов на ПАВ позволяет ослабить влияние внешних воздействий на результат измерения.

Величина ТКЧ зависит от физических свойств подложки резонатора на ПАВ, которые определяются используемым для ее изготовления пьезоэлектрическим радиоматериалом и ориентацией подложки относительно кристаллографических осей. Поскольку подложка влияет на сами электрические характеристики резонатора на ПАВ (а не только на их температурную зависимость), ее выбор должен позволять одновременно с достижением требуемого ТКЧ также достигать требуемых значений параметров электрических характеристик. Среди таких параметров наиболее важным является энергия излучаемого датчиком сигнала, определяющая достижимое значение сигнал – шум, и, следовательно, ограничивающая точность измерения и дальность действия системы. Поэтому выбор подложки резонатора на ПАВ для различных требований к значению ТКЧ является актуальной задачей из области разработки технических основ проектирования и конструирования радиотехнических устройств (а именно, датчиков) для систем телеметрии, используемых в промышленности, биологии, медицине, метрологии и других областях применения.

Вопросы, касающиеся функционирования системы телеметрии в целом, погрешности измерения, дальности действия в диссертации не рассматриваются. В данной работе рассмотрены вопросы конструирования радиотехнических устройств на основе резонаторов на ПАВ, используемых в качестве чувствительных элементов датчиков температур, в том числе в системах телеметрии, предусматривающих опрос нескольких датчиков. При этом учтена особенность резонаторов на ПАВ, предназначенных для указанного применения, которая заключается в специфических требованиях к зависимости характеристик резонатора на ПАВ от температуры.

Степень разработанности темы исследования. Среди ученых, заложивших основы использования в радиотехнике устройств на ПАВ вообще и резонаторов на ПАВ в частности, хотелось бы особо отметить Ю.В. Гуляева, Р.М. Уайта, М. Волтмера, Э. Аша. Исследование беспроводных пассивных датчиков температуры с чувствительными элементами на ПАВ

проводилось многими научными группами. Основные принципы построения таких датчиков изложены в 1990-х годах прошлого века в работах Л. Рэйнбла, А. Поля, В. Буффа, П. Шольца и других авторов. Последние разработки в данной области представлены в публикациях Д. Малохи, М.П. да Кунхи, С. Балландра и иных исследователей. К теме данной работы наиболее близки публикации В.А. Калинина (касающиеся выбора соотношения параметров резонатора на ПАВ и входного импеданса радиотехнического тракта, к которому он подключен), В.И. Чередника и М.Ю. Двоешерстова (касающиеся выбора пьезоэлектрических подложек для чувствительного элемента на ПАВ). В работах этих и некоторых других авторов обсуждается выбор соотношения параметров чувствительного элемента и параметров радиотехнического тракта для частных случаев; рассматриваются конкретные подложки, отдельные группы подложек или отдельные типы ПАВ на различных подложках; при этом обобщающие выводы по данным вопросам отсутствуют.

Цели и задачи исследования. Целью данной работы является совершенствование резонаторов на ПАВ для получения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика к температуре. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Определена зависимость энергии переизлученного датчиком сигнала от параметров резонатора на ПАВ и входного импеданса радиотехнического тракта, к которому он подключен.

2. Проведен расчет параметров ПАВ для всех возможных ориентаций подложки из четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических радиоматериалов и анализ результатов данного расчета. Определены ориентации подложек, имеющих наилучшие параметры для различных диапазонов измеряемой температуры, различной ширины рабочего диапазона частот системы и различного количества одновременно опрашиваемых датчиков.

3. Разработаны конструкции резонаторов на ПАВ для ряда подложек и проведены измерения их характеристик, в том числе для подложек, впервые предложенных в данной работе.

Научная новизна работы

1. Предложен метод расчета отклика резонатора на ПАВ при его импульсном опросе, учитывающий работу системы в двух различных режимах (в установившемся режиме во время действия опрашивающего импульса и в режиме переходного процесса во время приема отклика). С использованием метода определена максимально возможная эффективность переизлучения резонатором на ПАВ энергии электромагнитной волны и выведены соотношения параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта, при которых она достигается. При таком соотношении параметров энергия отклика выше, чем при обычно применяемом согласовании для установившегося режима.

2. Разработан метод выбора радиоматериала для подложки резонаторов на ПАВ и выбора ее ориентации для получения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика к температуре. В результате использования метода обнаружены ориентации подложки, позволяющие получить в несколько раз большее изменение разности резонансных частот пары резонаторов на ПАВ при изменении температуры, чем у ранее известных пар резонаторов на ПАВ.
3. Предложена новая конструкция чувствительного элемента датчика температуры для систем телеметрии. Особенностью предложенной конструкции данного радиотехнического устройства является размещение на одной подложке пары резонаторов на ПАВ, в которых используются ПАВ с различной поляризацией (волна Гуляева – Блюштейна (ВГБ) и квазирэлеевская волна). Такие пары резонаторов на ПАВ имеют более сильное различие ТКЧ и занимают меньшую площадь, чем при использовании ПАВ с одинаковой поляризацией.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертации состоит в определении максимально достижимых значений разницы ТКЧ при различных значениях требуемого коэффициента электромеханической связи (КЭМС) для четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических радиоматериалов. Определена максимально возможная эффективность переизлучения резонатором на ПАВ энергии электромагнитной волны при его импульсном опросе и определены параметры резонатора на ПАВ, при которых возможно достижение максимальной эффективности переизлучения энергии.

Практическая значимость диссертации заключается в составлении рекомендаций для разработчиков систем телеметрии по выбору материала и ориентации пьезоэлектрической подложки для резонатора на ПАВ, используемого в качестве чувствительного элемента датчика температуры, и рекомендаций по выбору соотношений параметров резонатора на ПАВ и параметров радиотехнического тракта. Использование при проектировании датчика этих соотношений позволяет получить при импульсном опросе на 20% большую энергию отклика, чем в случае использования соотношений, характерных для согласования в установившемся режиме.

На основе разработанных рекомендаций по выбору подложки предложена подложка из $70^\circ Y$ -среза кварца (нормаль к поверхности этой подложки отклонена на 70° от кристаллографической оси Y в сторону кристаллографической оси Z). При использовании этой подложки достигается большая разница ТКЧ пары резонаторов на ПАВ, чем при использовании ранее предложенных подложек: более чем на 25% для пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на разных подложках; более чем в 5 раз для пары резонаторов на ПАВ,

изготовленных на единой подложке. Это позволило, в частности, создать опрашиваемые электромагнитными волнами имплантируемые в живую ткань пассивные датчики температуры с точностью измерения $0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $30..45^{\circ}\text{C}$ для применения в медицине и биологии.

Результаты диссертационной работы использованы: 1) в АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург) при выполнении ОКР «Нерв» (государственный контракт №12411.1006899.11.074 от 14.05.2012 г.); 2) в ОАО «Фомос-Материалс» (Москва) при выполнении ОКР «Беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах для контроля физических параметров в широком диапазоне температур» (государственный контракт №02.527.12.0006 от 12.05.2009 г. в рамках участия РФ в 7-й Европейской рамочной программе).

Методология и методы исследования. В работе использовались методы математического анализа, методы линейной алгебры, дискретное преобразование Фурье, методы теории электрических цепей, метод конечных элементов для решения волнового уравнения. Проведена экспериментальная проверка наиболее значимых результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Максимальное значение энергии электромагнитной волны, излучаемой датчиком после окончания опрашивающего импульса, не превышает 60% от максимально возможной энергии, накопленной в резонаторе на ПАВ при заданных параметрах радиотехнического тракта и опрашивающего сигнала.
2. Энергия электромагнитной волны, излучаемой датчиком после окончания опрашивающего импульса, может достигать максимального значения при условии, что произведение добротности и коэффициента связи резонатора на ПАВ составляет не менее 4.
3. Согласование резонатора на ПАВ с радиотехническим трактом для импульсного опроса датчиков позволяет получить на 20% большую энергию электромагнитной волны, излучаемой датчиком после окончания опрашивающего импульса, чем в случае использования при импульсном опросе согласования для установившегося режима.
4. Использование 70°Y -среза кварца для изготовления на единой подложке пары резонаторов на ПАВ дает возможность получить разность ТКЧ более $130 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$. Для сравнения: наибольшая разность ТКЧ у ранее предлагавшихся для использования в системах телеметрии пар резонаторов на ПАВ, изготовленных на единой подложке, составляет $24 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ (т.е. ниже в 5,4 раза).
5. Резонатор на ПАВ, радиоматериалом подложки которого является кварц, а ориентация подложки определяется углами Эйлера ($0, 160^{\circ}, 90^{\circ}$), имеет положительный ТКЧ, превышающий $80 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$. Его использование в сочетании с известными резонаторами на ПАВ, имеющими ТКЧ $-95 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, позволяет получить разность ТКЧ более $175 \cdot 10^{-6}$

1/°С. Для сравнения: наибольший положительный ТКЧ у ранее предлагавшихся резонаторов на ПАВ составляет $38 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, что позволяет получить разность ТКЧ $133 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (т.е. ниже на 24%).

Достоверность результатов работы подтверждается совпадением результатов расчетов, проведенных с использованием различных методов, существенно отличающихся друг от друга, и соответствием результатов расчетов по предложенным методам и результатов экспериментов.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на шести конференциях: Перспективные системы и задачи управления (Красная Поляна, 2014), IEEE International Ultrasonics Symposium (Чикаго, США, 2014), SAW Symposium (Вена, Австрия, 2014), IEEE International Ultrasonics Symposium (Тайбэй, Тайвань, 2015), European Frequency and Time Forum (Йорк, Великобритания, 2016), Электромагнитное поле и материалы (Москва, 2016).

Всего по теме диссертации опубликовано 19 печатных работ. Из них 13 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК (в том числе 11 работ в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 1 патент на изобретение), 4 в трудах конференций и 2 в тезисах конференций (в том числе 1 в электронном виде). Доля авторского участия соискателя в работах [А5, А6, А16] составляет 75%; в работах [А4, А15] – 50%; в работах [А1 – А3, А7 – А10, А13, А15, А17, А19] – 25%; в работах [А12 – А14] – 10 %. Личный вклад автора диссертации: 1) разработка метода расчета отклика резонатора на ПАВ при его импульсном опросе и его реализация; 2) написание программы для расчета частотных характеристик устройств на ПАВ и разработка с ее использованием конструкций резонаторов на ПАВ; 3) анализ результатов измерения характеристик резонаторов на ПАВ; 4) разработка и реализация метода выбора материала и ориентации подложки для резонаторов на ПАВ.

1. ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ

1.1. Системы измерения температуры с датчиками на ПАВ

Одно из первых описаний беспроводного измерения температуры с использованием в качестве чувствительного элемента устройства на ПАВ опубликовано в 1987 г. [7]. К настоящему времени опубликовано не менее 150 работ, посвященных беспроводным системам измерения температуры, в которых в качестве чувствительного элемента используется устройство на ПАВ, а также общим вопросам, касающимся беспроводных измерений различных физических величин с использованием устройств на ПАВ.

Система беспроводного измерения состоит из опрашивающего устройства и одного или нескольких датчиков, а в некоторых случаях, также еще и из связывающего их устройства бесконтактной передачи радиосигнала (в большинстве случаев представляющего собой вращающееся сочленение, в котором отсутствует излучение в открытое пространство). В последнем случае каждый датчик представляет собой одно или несколько устройств на ПАВ. При отсутствии в системе устройства бесконтактной передачи радиосигнала опрашивающее устройство и каждый датчик оснащены антеннами. Чаще всего в рассматриваемых датчиках устройства на ПАВ подключены непосредственно к антенне, в некоторых случаях они соединяются с антенной посредством линии передачи, иногда в датчике присутствуют дополнительные элементы для согласования антенны и устройства на ПАВ. Преимуществом систем с устройством передачи является возможность производить более точные измерения (поскольку в них возможно получение более высокого соотношения сигнал – шум, чем в случае открытого радиоканала). Преимуществом систем с антеннами является большая универсальность, заключающаяся в большей свободе взаимного расположения и движения датчиков и опрашивающего устройства, а также в возможности размещения датчиков в местах, в которых невозможно их подключение к устройству передачи.

В большей части публикаций рассматриваются системы измерения, в которых датчики и опрашивающее устройство связаны посредством передачи сигнала через антенны. С одной стороны, это обусловлено тем, что достижение определенной точности и дальности измерения (под дальностью измерения понимается максимальное расстояние между антеннами опрашивающего устройства и датчика, при котором возможно измерение с требуемой точностью) при использовании открытого радиоканала является более сложной задачей, чем при использовании устройства передачи. С другой стороны, это обусловлено тем, что системы с

передачей сигнала через антенны имеют более широкое потенциальное применение в силу вышеупомянутой универсальности, в то время как применение систем с устройством передачи занимают среди множества применений ограниченную нишу.

С учетом ограниченного объема диссертационной работы, она будет сконцентрирована на получении чувствительного элемента с наилучшими параметрами. Таким образом, подробное рассмотрение методов и устройств опроса и антенн выходит за рамки данной диссертационной работы, однако некоторое ознакомление с ними требуется для понимания функционирования систем измерения в целом. Поэтому в обзоре помимо публикаций, касающихся конструкции чувствительных элементов, проведен также анализ публикаций, касающихся методов опроса и конструкции опрашивающих устройств, и публикаций, касающихся конструкции антенн. Поскольку характеристики устройств на ПАВ в значительной степени определяются параметрами используемой ПАВ, которые определяются свойствами материалов подложки и электродов, анализ публикаций, касающихся собственно конструкции чувствительных элементов, и публикаций, касающихся выбора материала для них, выделены в два отдельных параграфа. Для понимания актуальности и проработанности темы определен интерес представляет также информация о практическом применении рассматриваемых устройств.

Системы измерения различаются по возможностям опроса множества датчиков, по типу используемых устройств на ПАВ, а также по методу опроса датчиков. По первому признаку системы измерения можно разделить на 3 вида: с опросом единственного датчика (при этом возможен опрос нескольких датчиков отдельными опрашивающими устройствами, но в этом случае вся система по сути состоит из независимых систем опроса одного датчика), с последовательным опросом множества датчиков (в каждый момент времени в зоне действия опрашивающего устройства находится только один датчик) и с параллельным опросом множества датчиков (в зоне действия опрашивающего устройства могут одновременно находиться несколько датчиков). Различные варианты построения измерительных систем, опрашивающих несколько датчиков и использующих индивидуальные характеристики каждого из них для различения получаемых от них сигналов, наиболее подробно обсуждаются в [15]. Устройства на ПАВ с индивидуальными характеристиками, используемые для идентификации, называются устройствами радиочастотной идентификации или, сокращенно, метками. При опросе множества датчиков одним опрашивающим устройством каждый датчик выполняет также функции метки.

В случае последовательного опроса функции чувствительного элемента и метки могут быть полностью разделены, вплоть до выполнения их отдельными устройствами, однако одним из преимуществ устройств на ПАВ является возможность интегрирования этих двух устройств

в той или иной степени [11]. В случае параллельного опроса чувствительный элемент и метка объединены в одно устройство как физически, так и функционально. Способы различения отдельных датчиков при опросе множества датчиков разделяются на 4 основных типа: частотное разделение (отклик каждого датчика находится в отдельной полосе частот), временное разделение (отклик каждого датчика находится в отдельном временном диапазоне), кодовое разделение (отклики, пересекающиеся во времени и по полосе частот, различаются формой) и пространственное разделение (оно всегда присутствует при последовательном опросе множества датчиков, возможность его использования при параллельном опросе зависит от специфики применения системы измерения) [33]. Возможны также различные комбинации этих методов.

По типу чувствительного элемента системы измерения разделяются на два основных типа: системы с ЛЗ и системы с резонаторами на ПАВ. В узком смысле слова под ЛЗ понимается устройство, преобразующее исходный сигнал в сдвинутый на определенное время сигнал такой же формы. В более широком понимании ЛЗ можно называть устройство, преобразующее исходный сигнал в сумму нескольких сигналов такой же формы, сдвинутых на разное время (в общем случае имеющих разную амплитуду) или производящее с сигналом одновременно и операцию сдвига во времени, и некую операцию преобразования его формы. ЛЗ в узком смысле слова практически не используются в качестве чувствительных элементов датчиков температуры, отклик используемых устройств в самом простом случае состоит из двух сигналов, по форме повторяющих исходный сигнал, сдвинутых на разное время. Поэтому в данной работе под ЛЗ будем подразумевать ЛЗ в широком смысле слова, общими особенностями которых является существенная зависимость формы отклика от формы исходного сигнала и наличие задержки отклика, существенной для используемых способов его обработки.

Резонаторы отличаются тем, что их отклик существует во время действия опрашивающего сигнала и сразу после его окончания; при этом после окончания действия опрашивающего сигнала форма отклика практически не зависит от формы опрашивающего сигнала и определяется только параметрами резонатора (которые в некоторой степени зависят от значения измеряемой величины). Точность измерения существенно повышается при использовании пары резонаторов с различной зависимостью резонансной частоты от температуры, при этом температура определяется по разнице их резонансных частот [14, 37]. Таким образом, чувствительный элемент для практического применения состоит из пары резонаторов, как правило, подсоединенных параллельно к общей антенне (число резонаторов может быть и большим, что обычно связано с выполнением устройством и других функций помимо измерения температуры). Чувствительные элементы конструируются таким образом,

что рабочие полосы частот нескольких резонаторов практически не перекрываются, и опрос каждого из них практически независим от опроса других резонаторов. Поэтому для экспериментальных целей (отработка методов опроса, проверка работоспособности и сравнение компонентов системы измерения, в том числе самих резонаторов) вполне приемлемо и использование в качестве чувствительного элемента единственного резонатора. А также имеет смысл теоретический анализ такой системы, результаты которого в основном могут быть применены и к системе, опрашивающей чувствительный элемент из нескольких резонаторов.

Преимущества резонаторов обусловлены многократным прохождением ПАВ по одним и тем же участкам подложки, в результате чего существует возможность получить большую чувствительность к температуре, чем у ЛЗ, при одинаковых размерах или использовать чувствительный элемент меньшего размера при такой же чувствительности к температуре, как и у ЛЗ [77]. Также в резонаторе при одной и той же мощности опрашивающего сигнала можно накопить больше энергии, чем в ЛЗ, что позволяет достигать большей энергии отклика и большего соотношения сигнал – шум на входе приемника опрашивающего устройства [46]. Это дает возможность получить большую точность и дальность измерений. ЛЗ обладают преимуществом в основном применительно к системам с опросом множества датчиков. Преимущество заключается в возможности создания у ЛЗ характеристик сложной формы, что позволяет использовать все многообразие различных способов разделения датчиков. Применение резонаторов в качестве чувствительных элементов систем с опросом множества резонаторов также возможно, хотя и ограничено. При параллельном опросе оно возможно при использовании частотного разделения. При последовательном опросе может также использоваться кодовое разделение, при этом индивидуальный отклик каждого датчика формируется несколькими резонаторами [80].

Возможность применения тех или иных методов опроса зависит от типа чувствительного элемента и способа опроса множества датчиков. Основные принципы построения опрашивающего устройства определяются данными особенностями системы и типом опрашивающего сигнала. Опрашивающие сигналы можно подразделить на импульсные и непрерывные. При опросе множества датчиков используются как одинаковые сигналы для опроса всех датчиков (с различением откликов отдельных датчиков), так и сигналы индивидуальной формы для опроса каждого датчика (при этом форма откликов отдельных датчиков может быть как одинаковой, так и различной). Большинство измерительных систем проектируется для работы в диапазонах частот разрешенных для промышленного применения при условии ограниченной мощности излучения передатчика, в публикациях наиболее часто упоминаются диапазоны от 433,05 до 434,79 МГц и от 2,4 до 2,5 ГГц, несколько реже другие разрешенные диапазоны. Другие рабочие частоты иногда выбираются для экспериментального

оборудования и для некоторых применений, в которых возможно отсутствие данных ограничений. В некоторых публикациях обсуждается опрос сверхширокополосным сигналом с ограничением спектральной плотности мощности. Учитывая то, что в данной диссертации внимание сфокусировано на чувствительных элементах, техническая реализация опрашивающих устройств в обзоре публикаций практически не рассматривается, кратко рассмотрена структура опрашивающих устройств и более подробно используемые опрашивающие сигналы, которые непосредственно взаимодействуют с чувствительными элементами и влияют на выбор их конструкции.

1.2. Методы и устройства опроса датчиков на ПАВ

Более сложный отклик, характерный для ЛЗ, расширяет возможности применения разнообразных методов опроса, среди которых наиболее распространенным является опрос посредством частотно-модулированного (ЧМ) сигнала. Основной особенностью применения ЧМ сигнала для опроса ЛЗ является то, что определенный временной сдвиг между опрашивающим сигналом и откликом датчика приводит к наличию определенной разницы значений их мгновенной частоты. Это позволяет при использовании непрерывного сигнала выделять отклик датчика на фоне сигналов, связанных с отражением опрашивающего сигнала от объектов, окружающих датчик и опрашиваемое устройство, и различать отдельные компоненты отклика посредством частотной фильтрации сигнала разностной частоты, полученного при перемножении опрашивающего сигнала и отклика датчика. ЧМ сигнал может быть как непрерывным, так и импульсным [7], с линейным или ступенчатым изменением мгновенной частоты. Температура определяется по разнице времени задержки отдельных компонент отклика датчика (в простейшем случае импульсная характеристика используемой в датчике ЛЗ представляет собой два импульса с разным временем задержки). Наибольшая точность измерения достигается при измерении разности фаз компонент отклика [89]. Применение этого метода во многих случаях требует прибегать к дополнительной обработке сигнала из-за неоднозначной зависимости разницы времени задержки от разницы фазы (при ее изменении более чем на 360°) [79, 52]. Более простой способ измерения разницы времени задержки заключается в определении максимумов на импульсной характеристике датчика (полученной посредством дискретного преобразования Фурье), его точность ограничена временем дискретизации [88]. Данные методы могут применяться и для параллельного опроса множества датчиков при использовании временного разделения откликов разных датчиков [52].

Другим способом опроса ЛЗ является опрос короткими радиоимпульсами (короткими по сравнению с разницей времени задержки ПАВ, отраженной от разных отражающих решеток (ОР)) [85, 78]. Обработка сигнала осуществляется квадратурным детектором и аналогово-цифровым преобразователем. Температура измеряется посредством измерения разности фаз компонент отклика. Точность и дальность может быть увеличена при когерентном суммировании множества откликов датчика (это применимо и к другим методам опроса). При этом желательно исключать отклики слишком малой амплитуды [71]. Использование опрашивающего сигнала с частотой, изменяющейся в соответствии со связанным с температурой изменением центральной частоты встречно-штыревого преобразователя (ВШП) позволяет получать большую амплитуду отклика во всем диапазоне значений измеряемой температуры [57]. Сравнение опроса ЛЗ ЧМ импульсами и короткими радиоимпульсами приведено в [46]. Опрос коротким радиоимпульсом может применяться и для параллельного опроса множества датчиков с кодовым разделением при использовании в опрашивающем устройстве корреляционной обработки их откликов [72]. При этом для измерения температуры проводится последовательная обработка отклика с использованием опорных сигналов, соответствующих разным значениям температуры, и определение такого из них, при котором корреляция максимальна.

Возможен также опрос ЛЗ длительными радиоимпульсами (достаточно длительными для того, чтобы отдельные компоненты отклика ЛЗ частично перекрывались во времени). В этом случае для измерения температуры проводится последовательный опрос радиоимпульсами с различной несущей частотой и определяется такое ее значение, при котором перекрывающаяся часть компонентов отклика имеет минимальную амплитуду (за счет их сложения в противофазе). Преимуществами данного метода являются меньшая стоимость опрашивающего устройства, большая энергия и меньшая полоса частот опрашивающего сигнала [70].

Еще одним распространенным методом опроса ЛЗ является опрос сигналами специальной формы, соответствующей характеристике ЛЗ (согласованными сигналами). В первую очередь данный метод находит применение для опроса множества датчиков с кодовым разделением. Одним из вариантов данного метода является использование сигнала, форма которого представляет собой обращенную во времени импульсную характеристику ЛЗ, при этом отклик представляет собой короткий радиоимпульс. Для измерения температуры проводится последовательный опрос сигналами, соответствующими разным значениям температуры, и определение такого из них, при котором отклик максимален [65].

Другой вариант этого метода применим к устройствам, импульсная характеристика которых состоит из пары сигналов одной и той же специальной формы, имеющих разную

задержку во времени. Такие устройства опрашиваются сигналом, форма которого представляет собой обращенную во времени форму одного из сигналов пары, при этом отклик представляет собой пару коротких радиоимпульсов. Температура определяется по разнице времени задержки этих двух импульсов [24].

Точность измерения при параллельном опросе множества датчиков может быть повышена за счет использования системы из антенн с изменяющейся диаграммой направленности (это позволяет поочередно опрашивать группы датчиков, находящиеся в разных областях пространства) и за счет вычитания из принятого сигнала откликов датчиков, находящихся в зоне действия опрашивающего устройства помимо опрашиваемого датчика [75].

Существуют также конструкции ЛЗ, при использовании которых согласованным сигналом является линейно частотно-модулированный (ЛЧМ) импульс. Устройство, содержащее пару таких ЛЗ, можно опрашивать попеременно импульсами с нарастающей и убывающей частотой, температура определяется по разнице задержки откликов на разные опрашивающие импульсы [76]. Параллельный опрос множества подобных датчиков возможен либо с временным разделением откликов разных датчиков, либо с кодовым разделением при использовании более сложных ЛЗ, отклик которых на ЛЧМ импульс представляет собой несколько коротких импульсов [54]. В отличие от большинства датчиков, опрашиваемых сигналами, спектр которых находится в сравнительно узких диапазонах, разрешенных для излучения с определенной мощностью, датчик, предложенный в [54], опрашивается сверхширокополосными сигналами с ограниченной спектральной плотностью мощности (с полосами от 200 МГц до 400 МГц и от 2 ГГц до 2,5 ГГц). Это позволяет получить более короткие импульсы в отклике (около 10 периодов колебания несущей частоты), к которым может быть применена корреляционная обработка.

При использовании соответствующих конструкций ЛЗ возможен также опрос сигналом специальной формы, преобразующийся в отклик другой формы [17]. В [74] предлагаются ЛЗ с кодовым разделением, опрашиваемые ЧМ сигналом со ступенчато изменяющейся частотой, и имеющие отклики специальной формы, индивидуальной для каждого датчика. Отклики состоят из двух компонент одинаковой формы, имеющих разное время задержки, их обработка производится согласованным фильтром для отдельной компоненты, на выходе которого наблюдается два пика, температура определяется по разнице времени их появления. Точность измерения может быть повышена при использовании адаптивного фильтра, подстраивающегося под форму отклика, изменяющуюся с температурой. Обработка отклика ЛЗ с таким же принципом преобразования сигнала, но состоящего из единственной компоненты, осуществляется путем его последовательной корреляционной обработки с использованием

опорных сигналов, соответствующих разным значениям температуры, и определение такого из них, при котором корреляция максимальна [50].

Датчики с резонаторами на ПАВ в общем случае также могут опрашиваться как непрерывными, так и импульсными сигналами. Опрос непрерывным сигналом не дает возможности выделять отклик датчика на фоне сигналов, связанных с отражением опрашивающего сигнала от иных объектов посредством стробирования принимаемого сигнала. В связи с этим он имеет ограниченное применение, подходящее для достаточно сильной связи между антеннами опрашивающего устройства и датчиков или в системах с устройством передачи сигнала [8]. Известны варианты опроса датчиков с резонаторами ЧМ сигналом с гармонически изменяющейся частотой [23, 48] и ЛЧМ сигналом (при использовании для опроса стандартного анализатора цепей) [19]. Для отделения принимаемого антенной отклика от излучаемого ею опрашивающего сигнала в [19] предлагается использовать циркулятор и направленный ответвитель (данная система применялась при расстоянии между антенной опрашивающего устройства и датчиками 1 см). Выбор параметров резонатора на ПАВ при его опросе непрерывным сигналом, передаваемым через вращающееся сочленение, рассмотрен в [A7]. При использовании вращающегося сочленения с магнитной связью снижение изменения измеренного значения резонансной частоты достигается при использовании резонатора с более высоким характеристическим сопротивлением (это применимо, в том числе, и к датчикам температуры, а не только к датчикам крутящего момента, которым непосредственно посвящена эта публикация).

При опросе датчиков с резонаторами на ПАВ импульсными сигналами, как правило, приемник включается только после завершения опрашивающего импульса на время, в течение которого отклик датчика имеет достаточную амплитуду. Форма отклика датчика с резонатором на ПАВ практически не зависит от формы опрашивающего импульса и определяется формой временных зависимостей токов и напряжений в процессе свободных колебаний в резонаторе. Поэтому для опроса датчиков с резонаторами применяются простые радиоимпульсы, амплитуда отклика зависит от их частоты и длительности. Длительность импульса может быть выбрана достаточно большой, чтобы его спектр находился в разрешенном диапазоне частот.

Один из принципов опроса использует зависимость амплитуды отклика от частоты опрашивающего сигнала (в простейшем виде, с ручным изменением частоты и визуальным определением амплитуды, он использовался в одном из первых экспериментов по беспроводному измерению температуры с использованием резонатора на ПАВ [15]). Определение температуры производится посредством определения значения частоты опрашивающего импульса, при которой амплитуда отклика максимальна [5, 28, 80]. Повышение точности измерения возможно за счет вычисления частоты, при которой амплитуда

максимальна, по значениям амплитуды отклика при нескольких значениях частоты опрашивающего сигнала (с использованием аппроксимации зависимости амплитуды отклика от частоты), а также за счет усреднения результатов многократного измерения. Использование для генерации опрашивающего сигнала прямого цифрового синтеза позволяет получить лучшие характеристики, чем при использовании фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ, дифференциальное измерение позволяет предъявлять меньшие требования к стабильности источника опорного сигнала для измерения частоты.

Явными недостатками вышеописанного метода является измерение амплитуды, достижимая точность которой ниже, чем достижимая точность измерения частоты, и внесение дополнительной ошибки за счет того, что амплитуда отклика меняется во времени не только из-за изменения частоты опрашивающего импульса, но и из-за изменения условий распространения радиоволн. Другой метод опроса датчиков с резонаторами заключается в измерении частоты отклика, которая является частотой свободных колебаний. Один из возможных способов измерения частоты состоит в подсчете числа периодов колебания отклика в единицу времени, однако он практически не используется и упоминается только в [48] как способ, не позволивший получить желаемую точность измерения. Другой способ определения частоты отклика заключается в его использовании в системе ФАПЧ и измерении частоты перестраиваемого генератора. Такой способ сочетает сравнительно малую стоимостью оборудования с приемлемой точностью при дальности измерения до нескольких метров [73]. В [95] предлагается измерение частоты отклика резонатора с использованием интерференции между непосредственно принятым опрашивающим устройством откликом и его копией, задержанной на фиксированное время с помощью ЛЗ, входящей в состав опрашивающего устройства. Указывается, что такой метод позволяет получить сравнительно малое время обработки сигнала и малую стоимость оборудования, однако он хорошо подходит для систем с устройством передачи, а для систем с открытым радиоканалом он нуждается в дополнительной доработке для повышения помехозащищенности.

Более точное измерение частоты отклика возможно при использовании для его обработки дискретного преобразования Фурье. В [35] предлагается обрабатывать отклик квадратурным детектором, преобразовывать сигналы с его выходов в цифровой вид и применять к ним дискретное преобразование Фурье. В [38] для увеличения скорости обработки и уменьшения требуемого объема ОЗУ предложено вместо дискретного преобразования Фурье применять дискретное преобразование Хартли. В [37] предлагается преобразовывать в цифровой вид сигнал промежуточной частоты (пониженной с 434 МГц до 6 МГц в данном примере системы). Повышение точности измерения возможно за счет вычисления частоты отклика по нескольким значениям дискретного спектра, близким к максимальному значению (с

использованием аппроксимации спектра), а также за счет усреднения результатов многократного измерения.

Использование методов, предполагающих измерение частоты, позволяет применять опрашивающий сигнал с неизменной частотой. Однако в этом случае он должен иметь полосу, в которую попадают все значения резонансной частоты, соответствующие диапазону измеряемого параметра, но при этом передача энергии в резонатор получается малоэффективной (в резонатор передается только та часть энергии опрашивающего сигнала, которая соответствует сравнительно узкой полосе частот вблизи актуальной на данный момент резонансной частоты). Сочетание двух методов опроса позволяет получить отклик с амплитудой, близкой к максимальной, за счет соответствующего выбора частоты опрашивающего сигнала и измерить частоту отклика с высокой точностью [47]. В этом случае измерение состоит из двух этапов: предварительного поиска резонансных частот посредством последовательной передачи опрашивающих импульсов с разными значениями частоты и измерения амплитуды откликов и собственно измерения, при котором используются опрашивающие импульсы со значениями частоты, определенными на предыдущем этапе. Иной способ предварительного поиска резонансной частоты предложен в [38]: для каждого опрашивающего импульса определяется знак разности его частоты и частоты отклика, последующий опрашивающий импульс имеет частоту, значение которой находится между двумя ближайшими значениями частоты, отличие которых от частоты отклика имеет разный знак.

Сравнение точности измерения датчиками с ЛЗ (с опросом ЧМ импульсами и короткими радиоимпульсами) и датчиками с резонаторами (с опросом радиоимпульсами) приведено в [46]. Показано, что при использовании резонатора может быть достигнута более высокая точность измерения. Влияние разных источников шума на точность измерения при опросе резонаторов радиоимпульсами обсуждается в [44].

Как правило, измеряемая температура изменяется медленно по сравнению с периодом между измерением отдельных значений. Это обстоятельство позволяет повысить точность измерения при использовании полиномиальной аппроксимации зависимости температуры от времени и исключении отдельных измеренных значений, сильно отличающихся от значения аппроксимирующей функции, определенной по другим измеренным значениям. Алгоритмы такой обработки результатов измерения температуры рассмотрены в [99] и проверены экспериментально для датчика на основе ЛЗ. Более сложный алгоритм обработки множества измеренных значений, в котором коррекция результата производится посредством операций с матрицей из множества скорректированных измеренных значений, предложен в [58]. Этот способ экспериментально проверен для датчика на основе резонаторов на ПАВ.

1.3. Конструкция чувствительных элементов на ПАВ

Конструкции ЛЗ более разнообразны, чем конструкции резонаторов на ПАВ. Более широкое распространение получили отражательные линии задержки (ОЛЗ), структура которых состоит из одного ВШП и ОР, отражающих излученную им ПАВ обратно к нему. ОЛЗ наиболее простой конструкции содержит две ОР для получения в отклике двух компонент с разным временем задержки [7]. Больше количество ОР требуется для получения различных значений разности времени задержки: больших для более точного измерения и меньших для определения диапазона, в пределах которого разность времени задержки однозначно определяется разностью фазы [52]. Два разных типа ОЛЗ предлагалось использовать в качестве устройств, преобразующих ЛЧМ сигнал в короткий импульс: в одном из них используется простой ВШП и ОР изменяющимся периодом [76], в другом используются простые ОР и ВШП с изменяющимся периодом (ЛЧМ ВШМ) [53, 54]. В [53] отмечается значительное увеличение амплитуды отклика при подключении к ЛЧМ ВШП индуктивности, компенсирующей статическую емкость.

Более сложные конструкции имеют ЛЗ, предназначенные для параллельного опроса множества датчиков и имеющие индивидуальные характеристики. Помимо ОЛЗ для данных целей в некоторых публикациях предлагаются ЛЗ без ОР, состоящие из двух или более соединенных между собой ВШП (в данном случае ВШП не подразделяются на входные и выходные, каждый из них как преобразует опрашивающий сигнал в ПАВ, так и преобразует излученную другими ВШП ПАВ в отклик датчика). Такие ЛЗ могут иметь множество ВШП с разной полярностью и апертурой [94], пару ВШП с секциями разной полярности [17] или простой ВШП, по обе стороны от которого на разном расстоянии расположена пара одинаковых ВШП с секциями разной полярности [24]. В большей части публикаций предлагается использовать ОЛЗ. Формирование индивидуального отклика, как правило, осуществляется либо за счет наличия или отсутствия ОР в определенных позициях [72], либо за счет небольшого сдвига ОР, обеспечивающего сдвиг фазы отраженной ПАВ (наиболее используемым вариантом является использование двух возможных положений ОР, при которых фаза различается на 180°) [65]. Различные способы формирования индивидуального отклика описаны в [36]. ОР могут располагаться в одном или в нескольких акустических каналах [86]. Во многих более новых публикациях предлагается использовать ОР с различной рабочей полосой частот [74]. Это позволяет повысить точность измерения при параллельном опросе множества датчиков за счет уменьшения взаимного влияния откликов разных датчиков,

получить большее число индивидуальных характеристик, а также большую амплитуду отклика, и, соответственно, большую дальность измерения [66]. Отдельные вопросы конструкции ВШП и ОР таких ЛЗ для достижения лучших характеристик рассмотрены в [31, 51, 61, 62, 83]. В некоторых публикациях предлагается размещать две одинаковые группы ОР той или иной конструкции по обе стороны от ВШП на разных расстояниях от него [74, 75].

Конструкция резонаторов на ПАВ обсуждается в публикациях гораздо меньше, чем конструкция ЛЗ. Отчасти это обусловлено тем, основные требования к параметрам резонатора, используемого в качестве чувствительного элемента датчика температуры, не отличаются от основных требований к параметрам резонаторов, используемых для иных применений (за исключением требований к определенной зависимости резонансной частоты от температуры). Конструкции резонаторов для достижения высокой добротности, получения требуемой проводимости на резонансной частоте и малого уровня побочных пиков проводимости обсуждаются во многих публикациях, касающихся проектирования резонаторов на ПАВ вообще, не обязательно для использования в датчике температуры. Температурная зависимость резонансной частоты главным образом зависит от пьезоэлектрической подложки, на которой изготовлен резонатор. В зависимости от используемого разрешенного диапазона частот, диапазона измеряемой температуры и количества опрашиваемых резонаторов, оптимальными являются определенные значения температурных коэффициентов частоты (ТКЧ) резонаторов. Зачастую дополнительным требованием является изготовление пары резонаторов на единой подложке (а также может требоваться изготовление на этой же подложке резонаторов для измерения других величин помимо температуры). Поэтому подложки, выбираемые для датчиков с резонаторами на ПАВ, более разнообразны, чем подложки, используемые для устройств обработки сигналов и датчиков с ЛЗ. Поскольку на разнообразных подложках встречаются разнообразные значения фазы коэффициента отражения ПАВ от ОР, некоторое отношение к конструкциям резонаторов, используемых в датчиках, имеют методы проектирования резонаторов с произвольной фазой коэффициента отражения [A4, A10, A11, A19]. В [38] для получения сравнительно небольшого ТКЧ (около $7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) с высокой точностью предлагается использовать алюминиевые электроды определенной толщины; варьируя толщину электродов от 1% до 5% от периода ВШП можно на одной и той же подложке получить ТКЧ, изменяющийся примерно от 0 до $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (это актуально в случаях измерения температуры в большом диапазоне или опроса большого числа резонаторов). Подробнее подложки для резонаторов рассмотрены в следующем параграфе, посвященном материалам для чувствительных элементов.

1.4. Материалы для чувствительных элементов на ПАВ

Наиболее часто упоминаемыми в публикациях материалами пьезоэлектрических подложек для чувствительных элементов датчиков температуры являются ниобат лития, кварц и лангасит. Поскольку все эти материалы обладают существенной анизотропией механических и пьезоэлектрических свойств, свойства подложки определяются не только материалом, но и ее ориентацией относительно кристаллической структуры материала.

Наиболее распространенным материалом для ЛЗ, используемых в качестве чувствительных элементов датчиков температуры, является ниобат лития LiNbO_3 . При этом используются хорошо известные и массово производимые подложки, которые благодаря высокому коэффициенту электромеханической связи (КЭМС) уже нашли применение в устройствах обработки сигналов, несмотря на сравнительно низкую температурную стабильность (которая для этого применения является недостатком, а не преимуществом). Наиболее используемой является подложка из $Y-Z$ -среза ниобата лития [7, 24, 31, 51, 74, 76, 83]. Температурный коэффициент задержки (ТКЗ) ПАВ принимает значения $90..95 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, значение КЭМС близко к 4,35% [26]. Преимуществами $Y-Z$ -среза также является близкая к минимальной дифракционная расходимость и расположение вектора пьезоэлектрического эффекта вдоль поверхности подложки [26]. Подложка из $128^\circ Y-X$ -среза предлагается в публикациях [54, 57, 79, 89, 94]. ПАВ на данном срезе имеет меньший ТКЗ (расчетное значение составляет $70..75 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) и больший КЭМС (около 5%), чем на $Y-Z$ -срезе. Преимуществами $128^\circ Y-X$ -среза является менее сильная генерация ОАВ [26] и в некоторых случаях более высокая скорость ПАВ (что при использовании одной и той же технологии позволяет изготовить устройство с более высокой рабочей частотой) [53]. В [25] сравниваются потери на распространение ПАВ на данной подложке с подложками из двух других материалов; по результатам измерений акустические потери в ниобате лития оказались существенно ниже.

В качестве материала подложки для резонатора на ПАВ ниобат лития используется либо в экспериментальных системах измерения с единственным резонатором (предназначенных для проверки принципов работы, а не для практического использования) [5, 15], либо в паре с резонатором из другого материала [80]. ТКЧ резонатора достигает значений $-95..-90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Наиболее распространенным материалом для резонаторов на ПАВ, используемых в качестве чувствительных элементов датчиков температуры, является монокристаллический кварц SiO_2 . В отличие от ниобата лития, хорошо известные и массово производимые подложки из кварца, применяемые для устройств обработки сигналов, обладают высокой температурной стабильностью. В некоторых случаях они применимы и для датчика температуры. Для

получения определенного сравнительно небольшого ТКЧ за счет влияния материала электродов предлагается использовать $36^\circ Y$ - X -срез [38]; резонатор на ST -срезе используется в паре с другим резонатором (при использовании резонатора на подложке из ниобата лития, разность ТКЧ пары резонаторов превышает $70 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) [80].

Во многих других случаях требуются подложки, позволяющие получить большую абсолютную величину ТКЧ. При этом зачастую требуется, чтобы в то же время она была не слишком велика. Кроме требований к значению ТКЧ, при выборе подложки обычно учитывается значение КЭМС, а также может учитываться значение угла отклонения потока энергии, линейность зависимости резонансной частоты от температуры и возможность получения достаточно сильного отражения ПАВ от ОР. В некоторых случаях также требуется размещение пары резонаторов на единой подложке. В ряде публикаций предлагаются подложки из кварца, подобранные для соответствия тем или иным требованиям. В [14] выбираются направления для пары резонаторов на Y -срезе кварца, предлагается использовать направления распространения ПАВ, отклоненные от оси X на 36° и 45° , которым соответствуют близкие модулю и противоположные по знаку значения ТКЧ; разность ТКЧ составляет около $24 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. В [16] выбирается пара направлений для резонаторов на $35^\circ Y$ -срезе кварца, предлагается использовать ПАВ, распространяющуюся вдоль оси X , и ПАВ, распространяющуюся под углом 35° к оси X ; при измерении на закрепленной пластине разность ТКЧ составила $18..24 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. В [43] на $34^\circ Y$ -срезе для измерения крутящего момента и температуры предлагается использовать пару направлений распространения ПАВ, отклоненных от оси X на 45° и 30° (значение угла 30° выбрано исходя из компромисса между значением ТКЧ и достаточным отражением ПАВ от ОР из алюминиевых электродов приемлемой толщины, разница ТКЧ составляет около $15 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$).

В некоторых публикациях, в которых не обсуждается беспроводной опрос, предлагаются подложки, которые вполне могут использоваться и для беспроводных датчиков. Подложки, позволяющие получить близкую к линейной зависимость резонансной частоты от температуры, предлагаются в [41]. Это подложки с ориентацией $YXwlt/11^\circ 24' / 59^\circ 24' / 35^\circ$ и $YXlt/42,1^\circ / 39^\circ$, измеренные значения ТКЧ на которых составляют $28 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и $18 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. В [96] предлагается использовать ST -срез кварца с распространением волны перпендикулярно оси X , измеренное значение составило $31,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$; при этом скорость волны обладает низкой чувствительность к наличию вещества на поверхности кристалла, вдоль которой она распространяется. В [60] проведен анализ параметров ПАВ, распространяющихся на Y -срезе, X -срезе и вдоль оси X ; в качестве ПАВ с большим значением ТКЧ предлагаются ПАВ, распространяющиеся на X -срезе в направлениях, отклоненных от оси Y на 5° и 30° ; измеренные значения ТКЧ составляют $38 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и $19 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, соответственно; отмечается также относительно высокий ТКЧ (около $30 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) в сочетании с отсутствием отклонения потока энергии на $-25^\circ Y$ - X -срезе.

Лантангаллиевый силикат $\text{La}_5\text{Ga}_3\text{SiO}_{14}$ (лангасит) является наиболее широко используемым среди материалов, сохраняющих работоспособность при температуре свыше 1000°C . Как и в случае кварца, существуют хорошо известные и массово производимые подложки из лангасита с высокой температурной стабильностью при температурах, близких к комнатной. При изменении температуры в широком диапазоне ТКЧ существенно изменяется, поэтому данные подложки вполне могут использоваться для измерения температуры в соответствующих диапазонах (с использованием как резонаторов [A14, 19], так и ЛЗ [18, 100]). В ряде публикаций предлагаются и другие подложки для измерения температуры в диапазоне от комнатной температуры до $700..1000^\circ\text{C}$ [A14, 42, 81, 100]. Сравнение потерь на распространение ПАВ на подложке из X - Y -среза лангасита и подложках из Y - Z -среза ниобата лития и ST - X -среза кварца при рабочей частоте около 100 МГц показало, что они выше, чем в ниобате лития, при температуре до 600°C и ниже, чем в ниобате лития, при температуре более 650°C , а также, что они существенно ниже, чем в кварце; проверена работоспособность подложки из лангасита вплоть до 1085°C [42]. В ряде публикаций отмечается, что для корректного расчета температурной зависимости устройств на ПАВ при температурах, превышающих $200..400^\circ\text{C}$, необходимо уточнение значений материальных констант лангасита [A14, 4, 81]. Судя по приведенным данным, при комнатной температуре значения ТКЗ ПАВ на рассмотренных срезах лангасита находятся в пределах от $-30 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $35 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

В [20] проведен анализ параметров ПАВ, распространяющихся в различных направлениях на различных срезах различных кристаллов, в том числе ниобата лития, кварца и лангасита. В качестве наилучшей для использования в датчиках температуры подложки ниобата лития предлагается подложка с ориентацией, определяемой углами Эйлера ($0, 76^\circ, 90^\circ$); данная ориентация близка к ориентации подложки из Y - Z -среза и характеризуется параметрами ПАВ, близкими к параметрам ПАВ на Y - Z -срезе. Также предлагаются две подложки из кварца с ТКЗ от $-36 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $-32 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и 3 подложки из лангасита с ТКЗ от $-50 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $-39 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. ПАВ на данных подложках характеризуются малыми значениями угла отклонения потока энергии и малой дифракционной расходимостью. Экспериментальная проверка свойств предложенных подложек не проводилась.

Подложки из иных материалов используются в датчиках температуры очень редко. Тем не менее некоторые материалы могут представлять интерес для использования в данных целях. В [20] проведен анализ параметров ПАВ, распространяющихся в кристаллах танталата лития LiTaO_3 , германата висмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, тетрабората лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, ланганита и лангатата. Танталат лития интересен тем, что является одним из наиболее широко используемых пьезоэлектрических материалов для устройств обработки сигнала (следовательно, подложки из него сравнительно дешевы благодаря массовому производству); предложены две подложки из

него с ТКЗ от $-78 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Германат висмута отличается заметно более низкой скоростью ПАВ, чем в наиболее используемых материалах, что представляет интерес в случае особо высоких требований к миниатюрности устройства; предложены 3 подложки из него с ТКЗ от $102 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $113 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (что превышает значения ТКЗ для подложек из других материалов). Два последних материала, как и лангасит, которому они некоторым образом подобны (иногда в публикациях эти три материала называют семейством лангасита), работоспособны при температурах свыше 1000°C . Ланганит также интересен возможностью получения (согласно расчету) отрицательных значений ТКЗ (и, соответственно, положительных значений ТКЧ) по абсолютной величине значительно превышающих значения ТКЗ для подложек из других материалов; предложены 3 подложки из него с ТКЗ от $-111 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-88 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Так же предложены 4 подложки из тетрабората лития с ТКЗ от $63 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $84 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и для 3 подложки из лангата с ТКЗ от $-56 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-37 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные исследования других материалов представлены еще меньше. В [25] наряду с ниобатом лития и лангаситом в качестве материала, применимого для высокотемпературных датчиков, упоминается также фосфат галлия GaPO_4 . Однако материал применим только при рабочих частотах устройств не более 1 ГГц, а при меньших частотах потери на распространение на экспериментально исследованной подложке из него оказались заметно выше, чем для подложек из двух других материалов. В [92] приведены результаты измерения параметров резонаторов на подложках из оксибората гадолиния-кальция $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$, потенциально работоспособного до 1500°C ; значения ТКЧ на подложках с 4 различными ориентациями находятся в пределах от $-83 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-78 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Помимо монокристаллических материалов для изготовления подложек устройств на ПАВ возможно также использование пьезоэлектрических керамик. Например, в [93] экспериментально получен ТКЧ $-40 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ в сочетании с КЭМС более 7%, и, видимо, существуют широкие возможности по получению значительно больших по абсолютной величине значений ТКЧ, судя по тому, что значения ТКЧ от $-120 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-60 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ упоминаются как типичные для керамик других составов, а измеренный ТКЧ объемной акустической волны (ОАВ) в исследуемой керамике в зависимости от состава изменялся от $-290 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-150 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Препятствием для широкого использования керамики может являться значительно больший технологический разброс параметров, чем у монокристаллов, и более низкие значения рабочих частот, при которых материал имеет приемлемый уровень потерь.

Альтернативой пьезоэлектрическим подложкам для изготовления устройств на ПАВ являются структуры с тонкопленочными пьезоэлектрическими материалами. Применение таких структур в качестве датчика температуры обсуждается в [12, 56, 64]. В одном случае

измеренный ТКЧ составил около $-19 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур $20..70^{\circ}\text{C}$; во втором случае ТКЧ составил около $-34 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур $25..500^{\circ}\text{C}$ (в сочетании с КЭМС от 1,8% до 2,35%); в третьем случае получен ТКЧ от $-74 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $-41 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур $20..150^{\circ}\text{C}$ (в сочетании с КЭМС от 0,8% до 3,5%). Для широкого применения таких структур требуется совершенствование технологии изготовления пьезоэлектрических пленок; среди работ, ведущихся в этом направлении, находится разработка процесса нанесения пьезоэлектрических пленок с измерением в течение нанесения параметров ЛЗ на ПАВ, на поверхность которой наносится пленка [A17].

Наиболее распространенным материалом электродов устройств на ПАВ является алюминий. Он используется в подавляющем большинстве датчиков температуры на ПАВ, не предназначенных для работы при особо высоких температурах. Работоспособность устройств с электродами из алюминия сохраняется до $300..450^{\circ}\text{C}$ [12, 85]. В некоторых случаях необходимо учитывать влияние электродов на значение ТКЧ резонаторов на ПАВ [38] (в случае ЛЗ влияние гораздо слабее, поскольку большую часть пути распространения волна проходит по свободной поверхности).

Для датчиков, предназначенных для работы при более высокой температуре, требуются другие материалы электродов. Выбор материала электродов для датчика, работоспособного при температурах до 1000°C и выше, обсуждается в [A12, A14, 42, 67, 81, 98]. Поскольку такие материалы (в частности, платина, вольфрам, иридий) имеют высокую плотность, влияние изготовленных из них электродов на электрические характеристики устройств и их температурную чувствительность сильнее, чем влияние электродов из алюминия, и во многих случаях его необходимо учитывать [4]. Дополнительное диэлектрическое покрытие позволяет защитить как металл электродной структуры, так и незакрытую им поверхность подложки [A12, 9].

1.5. Примеры конструкции антенн датчиков на ПАВ

К антеннам, подключенным к опрашивающим устройствам, как правило, не предъявляется каких-либо особенных требований, характерных именно для данного применения. Поэтому обсуждение конструкций антенн, предназначенных именно для опрашивающих систем датчиков температуры на ПАВ, в публикациях практически отсутствует. Исключением является [75], где предлагается конструкция антенны с изменяемой направленностью для поочередного опроса разных секторов пространства. Однако можно

предположить, что в публикациях из области антенн существует гораздо больше информации об антеннах, применимых для данных целей.

Параметры антенн, подключенных к чувствительным элементам (устройствам на ПАВ), желательно должны быть такими, чтобы энергия переизлученного сигнала была максимальна в рабочей полосе частот опрашивающего устройства. Для достижения данного результата возможен как подбор конструктивных параметров антенны, так и конструктивных параметров устройств на ПАВ. Некоторые вопросы, касающиеся выбора соотношения параметров (согласования) антенны и резонатора на ПАВ при импульсном опросе, обсуждаются в [73]; в [45] обсуждается расчет амплитуды, длительности и частоты зависимости отклика от параметров антенны и резонатора; результаты расчета для отдельных резонаторов (с определенными значениями параметров) приведены в [45, 46]. Согласование антенны и ОЛЗ с использованием дополнительного элемента (индуктивности) обсуждается в [53]; несколько более сложные согласующие элементы, а также выбор конструктивных параметров антенны, позволяющий получить согласование без их использования, предлагаются в [21, 32]. Различные конструкции антенны обсуждаются и сравниваются [21, 22, 32]. Для миниатюризации датчика и удешевления его производства представляет интерес изготовление микрополосковой антенны на единой подложке с чувствительным элементом [30].

Для высокотемпературных датчиков к антенне, подключенной к чувствительному элементу, существует дополнительное требование, заключающееся в необходимости сохранения работоспособности при высокой температуре. Данное требование влияет на выбор материалов и технологии изготовления антенны. Примеры антенн для датчиков, работающих при температуре до 450°C, до 650°C и до 900°C, приведены в [26], [21] и [100], соответственно. Размеры антенны во многих случаях определяют размеры датчика, следовательно, в применениях, где размеры датчика критичны, существуют ограничения размеров антенны. Особенно жесткие требования к миниатюрности антенны предъявляются имплантируемым антеннам для биомедицинских применений, еще одной особенностью при этом является то, что антенна находится в среде со значительными электрическими потерями. Пример антенны для подобного применения с рабочей частотой 433 МГц, размещаемой вместе с резонатором на ПАВ в цилиндрической капсуле диаметром 8 мм и длиной 35 мм, можно увидеть в [63].

1.6. Применения датчиков

Во многих публикациях приводятся описания конкретных применений датчиков температуры на ПАВ. Данная информация полезна для понимания практической значимости исследований в этой области и достигнутого технического уровня.

Датчик для измерения температуры тормозных дисков локомотива описан в [71]. В [87] описано измерение температуры ротора высоковольтного (11 кВ) электрического мотора высокой мощности (750 кВт) и измерение температуры высоковольтных разрядников (420 кВ) на подстанции. Измерение температуры ткани в сушильном аппарате описывается в [86]. В [59] описана система измерения температуры коммутатора электрической сети. Работоспособность датчика, измеряющего температуру ротора высоковольтного высокоскоростного мотора, проверена при частоте вращения до 15 500 оборотов в минуту [10]. В [69] описывается измерение температуры поршня двигателя внутреннего сгорания с использованием беспроводного датчика температуры с чувствительным элементом на ПАВ, поставляемого на рынок фирмой SENSEOR (несмотря на использование в двигателе, измеряемая температура находилась в пределах от 25°C до 60°C). Измерение температуры снега и почвы с помощью устройства на ПАВ, размещенного на глубине несколько дециметров (с использованием антенны, конец которой выходит на поверхность) описан в [29]. В [48] описано применение датчиков на ПАВ в системе мониторинга давления и температуры в шинах автомобилей; датчик, разработанный для такой же системы, описан в [55]. Измерение температуры подвижных элементов оборудования гальванического цеха, контактирующих с электролитом (серной кислотой), описано в [27].

Помимо датчиков, функцией которых является именно измерение температуры, ее измерение зачастую необходимо для корректного измерения других физических величин, поскольку температура оказывает значительное влияние как на значения измеряемых параметров чувствительных элементов, так и на их чувствительность к изменению измеряемых величин. Датчик температуры позволяет осуществить коррекцию температурной зависимости чувствительности датчиков других величин. В таких случаях он является составной частью датчика иной физической величины, хотя при этом зачастую в систему добавляется также интерфейс, позволяющий измерять и саму температуру. Примерами такого использования датчика температуры являются датчик крутящего момента и температуры [16, 97], датчик давления и температуры [84].

Устройства на ПАВ при соответствующем выборе их материалов являются одними из наиболее работоспособных при высокой температуре радиокомпонентов (возможно

превышение 1000 °С). Беспроводной опрос упрощает задачу изоляции опрашиваемого устройства от области с высокой температурой. Поэтому датчики на ПАВ особо интересны для измерения температуры в диапазоне до 1000 °С (потенциально возможно и некоторое превышение этого уровня температуры). В [68] описывается измерение температуры ротора турбореактивного двигателя. Измеряемая температура достигала 525°С (при частоте вращения ротора, достигающей 65 000 оборотов в минуту). Датчик температуры для температурной компенсации показаний датчика концентрации кислорода в выхлопе камеры сгорания тестировался при температурах до 700°С [101].

Возможности миниатюризации датчиков на ПАВ делают их привлекательными для измерения температуры живых объектов в биологии и медицине. В [63] описывается опыт с прототипом датчика, находящегося в пищеварительном тракте собаки (измерение температуры не проводилось, исследование находилось в стадии отработки связи датчика с опрашивающим устройством). В [34] предлагается использовать имплантируемый датчик на ПАВ для измерения температуры определенных участков головного мозга в целях раннего предупреждения эпилептического припадка; пока в рамках данной работы был разработан датчик на ПАВ с проводным соединением, впоследствии предполагается сделать беспроводной вариант.

1.7. Выводы по главе 1

В обзоре публикаций рассматривается более широкий круг вопросов, чем тот, который может быть описан в диссертационной работе с ограниченным объемом. При выборе темы диссертации учтен уровень проработанности разных технических задач, касающихся беспроводного измерения температуры с использованием устройств на ПАВ в качестве чувствительных элементов. В диссертации будут рассматриваться вопросы конструкции чувствительных элементов для датчиков температуры. При этом внимание будет сконцентрировано на системах телеметрии с открытым радиоканалом, на повышении точности измерения в диапазоне температур, близких к комнатной температуре, и на минимизации размера датчика.

1. Как показал анализ публикаций, системы с параллельным опросом множества датчиков с одной стороны имеют существенные особенности и требуют отдельного рассмотрения, с другой стороны, им посвящена значительная часть публикаций, и многие вопросы их конструирования хорошо изучены. В данной диссертации задача опроса множества

датчиков рассматриваться не будет, хотя рассматриваемые датчики могут использоваться и таким образом. В соответствии с вышеуказанными приоритетами, для целей данной работы рассмотрение датчиков с резонаторами на ПАВ является более важным, чем рассмотрение датчиков с ЛЗ. При этом конструкции и выбор материала для ЛЗ проработаны в большей степени, чем конструкции и выбор материала для резонаторов. Таким образом, учитывая объем, в диссертационной работе будут рассматриваться резонаторы на ПАВ, используемые в качестве чувствительных элементов датчиков температуры.

2. Одной из актуальных задач, сравнительно мало проработанных в рассмотренных публикациях, является задача выбора параметров радиотехнического тракта и подключенного к нему резонатора на ПАВ, обеспечивающих максимальную амплитуду отклика. Решение данной задачи позволяет повысить дальность и точность измерений. В некоторых рассмотренных публикациях решаются задачи выбора параметров антенны для ее согласования с непосредственно подключенным к ней резонатором, имеющим определенные параметры. При этом конструкция антенны также влияет на мощность опрашивающего сигнала, поступающего на чувствительный элемент, кроме того, антенна, существенно влияет на размер и форму датчика, поэтому в ряде случаев к ней предъявляются дополнительные требования, связанные с ограничением размеров датчика. Поэтому желательно иметь максимальную свободу в выборе конструкции антенны. Во многих случаях параметры антенны существенно зависят от окружающих ее объектов и могут значительно меняться в процессе эксплуатации датчика. При использовании конструкций, в которых резонатор не подключается к антенне непосредственно, и в системах с устройством передачи также предпочтительно выбирать параметры резонатора для его согласования с радиотехническим трактом, конструкция элементов которого выбрана исходя из достижения наилучших характеристик системы. Кроме того, полезно знать, при каких параметрах резонатора возможно наилучшее согласование. Поэтому следует рассмотреть влияние параметров резонатора на отклик датчика при различных значениях параметров радиотехнического тракта, а также обратить внимание на влияние изменения параметров радиотехнического тракта. Поскольку для системы с резонатором на ПАВ и передачей сигнала по открытому радиоканалу предпочтительным является опрос импульсным сигналом с приемом отклика после окончания опрашивающего импульса, будет рассмотрено согласование радиотехнического тракта и резонатора на ПАВ именно при таком методе опроса.

3. Помимо амплитуды отклика другим столь же важным параметром датчика является зависимость информационного параметра отклика от измеряемого параметра. В данном случае это зависимость частоты свободных колебаний от температуры, которая главным образом определяется свойствами используемой в резонаторе ПАВ подложки, зависящими в основном от материала подложки и ее ориентации относительно кристаллической структуры материала. В рассмотренных публикациях отсутствует исчерпывающий анализ всевозможных ориентаций пьезоэлектрических подложек, из числа которых на его основе можно выбрать подложки для получения пар резонаторов с наилучшими параметрами. Наибольшая разница ТКЧ среди предложенных пар резонаторов, изготовленных на единой подложке, составляет $24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Максимальное и минимальное измеренные значения ТКЧ составляют $38 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и $-95 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, соответственно; таким образом, разница ТКЧ пары резонаторов на предложенных подложках может достигать $133 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Учитывая ограниченный объем диссертационной работы, будет проведен анализ параметров ПАВ при комнатной температуре для четырех наиболее используемых материалов (кварца, ниобата лития, лангасита и танталата лития). Хотя высокотемпературные датчики являются одним из наиболее актуальных применений резонаторов на ПАВ, как показал анализ публикаций, их рассмотрение имеет свои особенности и является отдельной задачей, которую в рамках одной диссертации трудно совместить с поставленными здесь задачами (при этом результаты анализа согласования резонатора и радиотехнического тракта вполне применимы и к ним). Для решения задачи минимизации размера устройства наибольший интерес представляют пары резонаторов, размещаемые на единой подложке (особенно это актуально при изготовлении антенны на той же подложке).

Описанные в публикациях варианты применения беспроводных систем измерения температуры с чувствительными элементами на ПАВ, как практически используемые, так и находящиеся в той или иной стадии разработки и требующие определенных усовершенствований тех или иных компонентов систем, демонстрируют актуальность и практическую значимость исследований в данной области. Рассмотренная здесь задача получения максимальной точности измерения температур, близких к комнатной, и минимизации размера датчика наиболее актуальна для биомедицинских применений, однако может представлять интерес и для других применений.

2. СОГЛАСОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА НА ПАВ С РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ ТРАКТОМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОПРОСЕ ДАТЧИКА

2.1. Методы расчета энергии переизлученного сигнала

Энергия сигнала, получаемого опрашивающим устройством от датчика, определяет соотношение сигнал – шум в опрашивающем устройстве, и, таким образом, влияет на точность и дальность измерения. Поскольку устройство на ПАВ является пассивным устройством, энергия переизлученного датчиком сигнала ограничена энергией сигнала, принятого им. Таким образом, достижение максимально возможной энергии переизлученного сигнала возможно только при наилучшем согласовании устройства на ПАВ с радиотехническим трактом, к которому оно подключено.

Часть излучаемого датчиком сигнала выходит за пределы времени, отведенного на его прием, либо до окончания данного времени его амплитуда достигает некоторого порогового значения, превышение которого необходимо для корректной работы опрашивающего устройства. Время приема сигнала и пороговое значение его амплитуды зависит от реализации опрашивающего устройства. Без привязки к конкретной системе имеет смысл рассмотреть полную энергию переизлученного сигнала в качестве величины, ограничивающей наилучший достижимый результат. Зависимость спектра стробированного отклика от времени его приема обсуждается в [73], но рекомендаций по выбору параметров резонатора и соединенного с ним радиотехнического тракта в этой публикации не приводится.

Для расчета энергии переизлученного сигнала необходимо рассчитать зависимость проводимости резонатора на ПАВ Y от частоты f . Используемый подход к расчету характеристик устройств на ПАВ называется методом связанных мод (в англоязычной литературе «coupling of modes method», сокращенно «СОМ method»). Подробное описание теории данного подхода и расчета характеристик устройств на ПАВ на его основе приведено в [40].

В рамках метода связанных мод ВШП и ОР рассматриваются как отрезки периодической структуры из электродов, в которой вдоль оси x распространяются в противоположных направлениях две связанных акустических волны с амплитудами A_+ и A_- (в направлении возрастания x и в направлении убывания x , соответственно). ВШП характеризуются также комплексной амплитудой тока, протекающего в шинах, к которым присоединены электроды, I_B и напряжением между шинами U . A_+ , A_- и I_B зависят от координаты x , i -й элемент структуры

устройства на ПАВ, края которого находятся на точках с координатами x_{i-1} и x_i , описывается матрицей $[H]_i$:

$$\begin{pmatrix} A_+(x_i) \\ A_-(x_i) \\ U \\ I_B(x_i) \end{pmatrix} = [H]_i \begin{pmatrix} A_+(x_{i-1}) \\ A_-(x_{i-1}) \\ U \\ I_B(x_{i-1}) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Однопортовое устройство на ПАВ, состоящее из N компонент, расположенных в одном акустическом канале, можно описать матрицей $[H]$, являющейся произведением матриц, соответствующих отдельным компонентам $[H]_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$):

$$[H] = \prod_{i=1}^N [H]_i. \quad (2)$$

Ток в шинах на одном конце устройства можно положить равным нулю $I_B(x_0) = 0$, тогда ток, протекающий через устройство, равен току в шинах на другом конце устройства $I_B(x_N)$. С учетом отсутствия акустических волн, падающих на устройство извне, ($A_+(x_0) = 0$ и $A_-(x_N) = 0$) выражение, связывающее проводимость с элементами матрицы $[H]$:

$$Y = \frac{H_{23}H_{42} - H_{43}H_{22}}{H_{22}}. \quad (3)$$

Для ВШП, имеющего длину L , матрица $[H]_i$ имеет следующий вид:

$$[H]_{IDT} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_p L) - j \frac{\theta_u}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & -j \frac{k_{12}}{\theta_p} \sin(\theta_p L) \\ j \frac{k_{12}^*}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & \cos(\theta_p L) + j \frac{\theta_u}{\theta_p} \sin(\theta_p L) \\ 0 & 0 \\ \frac{4\zeta}{\theta_p} \left\{ \left(\frac{\theta_u - k_{12}^*}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] + j \sin(\theta_p L) \right\} & -\frac{4\zeta}{\theta_p} \left\{ \left(\frac{\theta_u - k_{12}}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] - j \sin(\theta_p L) \right\} \\ \frac{\zeta}{\theta_p} \left[\left(\frac{\theta_u - k_{12}}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] + \sin(\theta_p L) \right] & 0 \\ \frac{\zeta}{\theta_p} \left[\left(\frac{\theta_u - k_{12}^*}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] - \sin(\theta_p L) \right] & 0 \\ \left\{ 8 \left(\frac{\zeta}{\theta_p} \right)^2 [\theta_u - \text{Re}(k_{12})] \left(1 - \frac{\sin(\theta_p L)}{\theta_p L} \right) - \omega C_{IDT} \right\} jL & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота; ζ – коэффициент, связывающий амплитуду излучаемой ВШП акустической волны с приложенным к нему напряжением; k_{12} – коэффициент связи акустических волн, распространяющихся в противоположных направлениях; θ_u и θ_p –

отклонение от $\frac{\pi}{p}$ (p – шаг электродов) волнового числа парциальных и связанных волн, соответственно; C_{IDT} – статическая емкость ВШП, отнесенная к его длине. θ_p связано с θ_u и k_{12} соотношением

$$\theta_p = \sqrt{\theta_u^2 - |k_{12}|^2}. \quad (5)$$

Параметр k_{12} приближенно можно считать независимым от частоты и обратно пропорциональным p . Зависимость от частоты θ_u можно аппроксимировать выражением

$$\theta_u = \left(\frac{\omega}{V_{ref}} + k_{11} \right) \left(1 - j \frac{\alpha_\lambda}{40\pi \lg(e)} \right) - \frac{\pi}{p}, \quad (6)$$

где V_{ref} и k_{11} – параметры, определяющиеся центральной частотой и шириной полосы брэгговского отражения, α_λ – затухание ПАВ за счет потерь на расстоянии, равном длине волны. Приближенно V_{ref} можно считать константой, k_{11} можно считать независимым от частоты и обратно пропорциональным p . Параметр ζ приближенно можно считать независимым от частоты и обратно пропорциональным p .

V_{ref} , α_λ , $k_{11}p$, $k_{12}p$, ζp и C_{IDT} являются параметрами уравнений связанных мод (далее будем называть их СОМ-параметры от принятого в англоязычной литературе термина «СОМ parameters») и вместе с конструктивными параметрами устройства на ПАВ представляют собой исходные данные для расчета характеристик устройств на ПАВ методом связанных мод. Значения V_{ref} , $k_{11}p$ и $|k_{12}p|$ определяются по зависимости $\theta_s(f)$, рассчитываемой для бесконечной периодической структуры из короткозамкнутых между собой электродов. Для определения значений ζp и $\arg(k_{12})$ требуется также частотная зависимость волнового числа ПАВ в бесконечной периодической структуре из не связанных между собой электродов. Параметры ПАВ в этих структурах определяется в результате решения уравнений движения совместно с уравнениями пьезоэффекта и граничными условиями. Значение C_{IDT} определяется в результате решения аналогичных уравнений для бесконечного периодического ВШП. Значение α_λ подбирается для получения добротности, соответствующей экспериментальным значениям.

Расчет параметров ПАВ в бесконечной периодической структуре из идеально проводящих полосок (электродов) прямоугольного сечения бесконечной длины производился посредством модифицированной программы FEMSDA [39]. Исходными данными для этой программы являются плотность, модули упругости, пьезоэлектрические модули и компоненты тензора диэлектрической проницаемости материала подложки, параметры, характеризующие ее ориентацию относительно кристаллографических осей, а также плотность и модули упругости материала электродов, их ширина и толщина. Связь частотной зависимости скорости и затухания ПАВ в бесконечной периодической структуре с СОМ-параметрами обсуждается в

[40]. В диссертационной работе использовался алгоритм вычисления СОМ-параметров незначительно отличающийся от предложенного в [40] и приводящий к тем же результатам. Результаты расчета отдельных СОМ-параметров таким методом, их сравнение с другими расчетами и с экспериментальными данными приведены в [А4 – А6, А10, А11, А19].

Для ОР из короткозамкнутых между собой электродов, имеющей длину L , матрица $[H]_i$ имеет вид

$$[H_R] = \begin{pmatrix} \cos(\theta_p L) - j \frac{\theta_u}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & -j \frac{k_{12}}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & 0 & 0 \\ j \frac{k_{12}^*}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & \cos(\theta_p L) + j \frac{\theta_u}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

для участка свободной поверхности длиной L матрица $[H]_i$ имеет вид

$$[H_G] = \begin{pmatrix} e^{-j \frac{\omega L}{V} \left(1 - j \frac{\alpha_z}{40\pi \lg(e)}\right)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j \frac{\omega L}{V} \left(1 - j \frac{\alpha_z}{40\pi \lg(e)}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где V – скорость ПАВ на свободной поверхности. Расчет скорости ПАВ на свободной поверхности производился посредством модифицированной программы VCAL [39] (исходными данными являются плотность, модули упругости, пьезоэлектрические модули и компоненты тензора диэлектрической проницаемости материала подложки).

Программа расчета частотных характеристик устройств на ПАВ с использованием вышеописанного алгоритма была написана в среде MathCad. Результаты расчета частотных характеристик устройств на ПАВ, их сравнение с измеренными характеристиками приведены в [А4, А10, А11, А19].

Для выполнения задач диссертационной работы в программу расчета частотных характеристик устройств на ПАВ добавлены модули расчета временной зависимости отклика резонатора и вычисления энергии переизлученного сигнала. Воздействующий на устройство сигнал описывается множеством мгновенных значений ЭДС в дискретные моменты времени, шаг дискретизации по времени выбирается исходя из частоты сигнала. К множеству значений ЭДС применяется дискретное преобразование Фурье, в результате получается спектр

воздействующего сигнала, шаг дискретизации по частоте выбирается исходя из времени, в течение которого отклик устройства имеет заметную величину. Дискретные значения спектра тока, протекающего через источник воздействующего сигнала и устройство, рассчитываются как отношение значений спектра воздействующего сигнала к сумме импедансов устройства на ПАВ и источника при соответствующих значениях частоты. Зависимость тока от времени получается в результате применения к спектру тока обратного дискретного преобразования Фурье. Энергия сигнала, переизлученного датчиком после окончания воздействующего сигнала, рассчитывается как произведение активной части импеданса источника (он же является входным импедансом тракта), шага дискретизации по времени и суммы квадратов дискретных значений тока, соответствующих значениям времени, превышающим время окончания действия опрашивающего импульса.

Описанный выше численный расчет не позволяет сделать обобщающих выводов о том, какие значения параметров резонатора на ПАВ и тракта являются наилучшими. С целью определения основных тенденций влияния этих параметров на энергию переизлученного сигнала и определения областей их значений, при которых эта энергия максимальна, проведен приближенный аналитический расчет. Для этого рассмотрена простейшая модель резонатора на ПАВ, известная как эквивалентная схема Баттерворта – ван Дайка. Она представляет собой статическую емкость C_S соединенную параллельно с последовательным колебательным контуром (динамической ветвью). Динамическая ветвь состоит из динамической емкости C , динамической индуктивности L и сопротивления резонатора на частоте последовательного резонанса r . Радиотехнический тракт, к которому подсоединен резонатор, будем характеризовать импедансом (на рабочей частоте) $Z_A = R_A + jX_A$. ЭДС эквивалентного источника $e(t)$ определяется опрашивающим сигналом. Эквивалентная схема, моделирующая резонатор, соединенный с трактом, приведена на рис. 2.

Более удобный набор параметров схемы замещения — это частота последовательного резонанса (резонансная частота) $f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, добротность $Q = \frac{\omega_r L}{r} = \frac{f_r L}{2\pi r}$ и коэффициент связи $K_c = \frac{C}{C_S}$. Дополнительными параметрами являются частота параллельного

резонанса (антирезонансная частота) $f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = \frac{\sqrt{C + C_S}}{2\pi\sqrt{LCC_S}} = f_r\sqrt{1 + K_c}$ и сопротивление резонатора на частоте параллельного резонанса $R = \frac{r(K_c Q)^2}{1 + K_c}$.

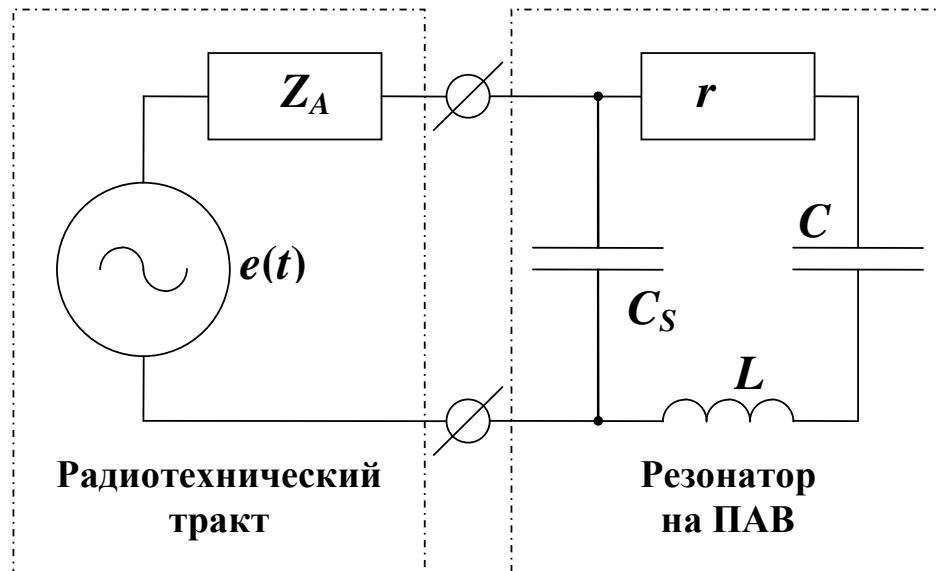


Рис. 2. Эквивалентная схема резонатора на ПАВ, подсоединенного к радиотехническому тракту

Рассмотрим случай чисто активного сопротивления тракта ($X_A = 0$, $Z_A = R_A$). Наличие реактивного сопротивления, а также дополнительных элементов приближенно может быть учтено в виде поправок к значениям коэффициента связи и добротности резонатора. Изменение K_c обусловлено увеличением или уменьшением эквивалентной статической емкости за счет подключения параллельно с C_S дополнительной емкости или индуктивности, соответственно. Изменение эквивалентной добротности связано с дополнительными потерями, которые вносят дополнительные элементы, имеющие значительно меньшую добротность, чем резонатор на ПАВ (при невыполнении этого условия резонансные свойства радиотехнического тракта могут существенно искажать зависимость отклика от температуры). В случае чисто активного входного сопротивления радиотехнического тракта вся энергия, запасенная в чувствительном элементе во время действия опрашивающего импульса, запасена в реактивных элементах схемы замещения резонатора. Примеры расчета амплитуды отклика с учетом реактивной части сопротивления антенны для некоторых частных случаев приведены в [45, 46]. Рассмотрим использование в качестве опрашивающего сигнала радиоимпульса с несущей частотой f_I и амплитудой E_I : $e(t) = E_I \cos(2\pi f_I t + \varphi_I)$. Запасенная энергия зависит от длительности импульса, однако, для определения максимальных достижимых значений следует рассмотреть установившийся режим.

Задачей расчета с использованием эквивалентной схемы является выявление основных тенденций, поэтому, по возможности, будем находить приближенные выражения максимально удобные для анализа. При этом следует учитывать фактические параметры практически используемых резонаторов. Для данной цели можно полагать, что Q находится в диапазоне от

$2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$, а K_c находится в диапазоне от 10^{-4} до 0,1. При таких значениях параметров контура $f_a \approx f_r(1 + K_c/2)$, $R \approx r(K_c Q)^2$. Частота опрашивающего сигнала должна быть достаточно близка к резонансной частоте, будем полагать, что f_l находится в диапазоне от $0,999f_r$ до $1,001f_a$. Расчет энергии переизлученного сигнала будет проведен путем интегрирования по времени мощности, рассеиваемой на входном сопротивлении радиотехнического тракта при свободных колебаниях. Временная зависимость протекающего через входное сопротивление радиотехнического тракта тока будет определена путем решения дифференциального уравнения, описывающего свободные колебания.

2.2. Зависимость накопленной энергии от параметров радиотехнического тракта и резонатора

Среднее значение энергии, запасенной в динамической индуктивности $W_L = \frac{I^2 L}{4}$, где I – амплитуда тока, протекающего через динамическую индуктивность. Среднее значение энергии, запасенной в динамической емкости $W_C = \frac{U_C^2 C}{4}$, где U_C – амплитуда напряжения на динамической емкости. Среднее значение энергии, запасенной в статической емкости $W_S = \frac{U^2 C_s}{4}$, где U – амплитуда приложенного к резонатору напряжения. Обозначим проводимость динамической ветви Y_m , тогда амплитуда тока в этой ветви $I = U|Y_m|$, амплитуда напряжения на динамической емкости $U_C = \frac{I}{\omega C} = \frac{U|Y_m|}{\omega C}$, где ω – циклическая частота, применительно к воздействию опрашивающего сигнала $\omega = 2\pi f_l$.

$$Y_m = \frac{1}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{1}{r(1 + j\xi)}, \quad (9)$$

где расстройка $\xi = Q\left(\frac{f_l}{f_r} - \frac{f_r}{f_l}\right) \approx 2Q \frac{f_l - f_r}{f_r}$, значения ξ находятся в диапазоне от $-0,002Q$ до $(0,002 + K_c)Q$.

Полная энергия, запасенная в контуре

$$W = W_S + W_L + W_C = \frac{U^2}{4} \left(C_S + |Y_m|^2 L + \frac{|Y_m|^2 C}{(\omega C)^2} \right) = \frac{U^2}{4} C_S \frac{\left(1 + \xi^2 + K_c Q^2 \left(1 + \frac{1}{F^2} \right) \right)}{1 + \xi^2}, \quad (10)$$

где нормированная частота $F = \frac{f_l}{f_r}$, значения F находятся в диапазоне от 0,999 до $1,001 + \frac{K_c}{2}$.

Учитывая также диапазоны значений Q и K_c , получаем приближенное выражение

$$W \approx \frac{U^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2}{1 + \xi^2}. \quad (11)$$

При указанных значениях f_l , Q и K_c практически вся запасенная в контуре энергия запасена в элементах динамической ветви (в статической емкости запасается не более 10% энергии). Надо заметить, что данное соотношение применимо как при частотах, близких к f_r (при отклонении f_l от f_r не превышающем 0,1% в статической емкости запасается не более 5% энергии), так и при частотах, близких к f_a (в этом случае доля энергии, запасенной в статической емкости, близка к значению K_c).

Амплитуда напряжения, приложенного к резонатору, связана с амплитудой ЭДС эквивалентного источника соотношением

$$U^2 = \frac{E_l^2}{\left| 1 + R_A \left[j\omega C_S + \frac{1}{r(1 + j\xi)} \right] \right|^2} = \frac{E_l^2 (1 + \xi^2)}{\left| 1 + j\xi + R_N \left[1 + jF \frac{1 + j\xi}{K_c Q} \right] \right|^2} = \quad (12)$$

$$= \frac{E_l^2 (1 + \xi^2)}{\left[1 + \left(\frac{FR_N}{K_c Q} \right)^2 \right] \xi^2 - \frac{2FR_N^2}{K_c Q} \xi + R_N^2 + 2R_N + \left(\frac{FR_N}{K_c Q} \right)^2 + 1},$$

где $R_N = R_A/r$.

Подставляя (12) в (11) и учитывая, что $F \approx 1$, получаем приближенное выражение для запасенной энергии

$$W \approx \frac{E_l^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2}{(1 + R_n^2) \xi^2 - 2R_n R_n \xi + R_n^2 + 2R_n + R_n^2 + 1}, \quad (13)$$

где нормированное сопротивление радиотехнического тракта $R_n = \frac{R_N}{K_c Q} = \frac{R_A}{r K_c Q} \approx \frac{R_A}{\sqrt{rR}}$.

Приближенная зависимость энергии от частоты имеет максимум на оптимальной частоте f_w , при которой знаменатель выражения (13) принимает минимальное значение. Соответствующее значение $F = F_w$ будем называть оптимальной нормированной частотой, а соответствующее

значение $\xi = \xi_W$ будем называть оптимальной расстройкой. Значение ξ_W удовлетворяет уравнению

$$\left. \frac{\partial W(\xi)}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_W} = 2(1 + R_n^2)\xi_W - 2R_N R_n = 0. \quad (14)$$

В результате

$$\xi_W = \frac{R_N R_n}{1 + R_n^2} = \frac{K_c Q R_n^2}{1 + R_n^2}, \quad (15)$$

соответственно, $F_W = \frac{K_c}{2} \frac{R_n^2}{1 + R_n^2} + 1$,

$$f_W = \left(\frac{K_c}{2} \frac{R_n^2}{1 + R_n^2} + 1 \right) f_r. \quad (16)$$

Наиболее удобно данная зависимость представляется графиком $\xi_W(R_n)$, нормированной на $K_c Q$, приведенном на рис. 3. При таком представлении одна кривая описывает всевозможные значения параметров.

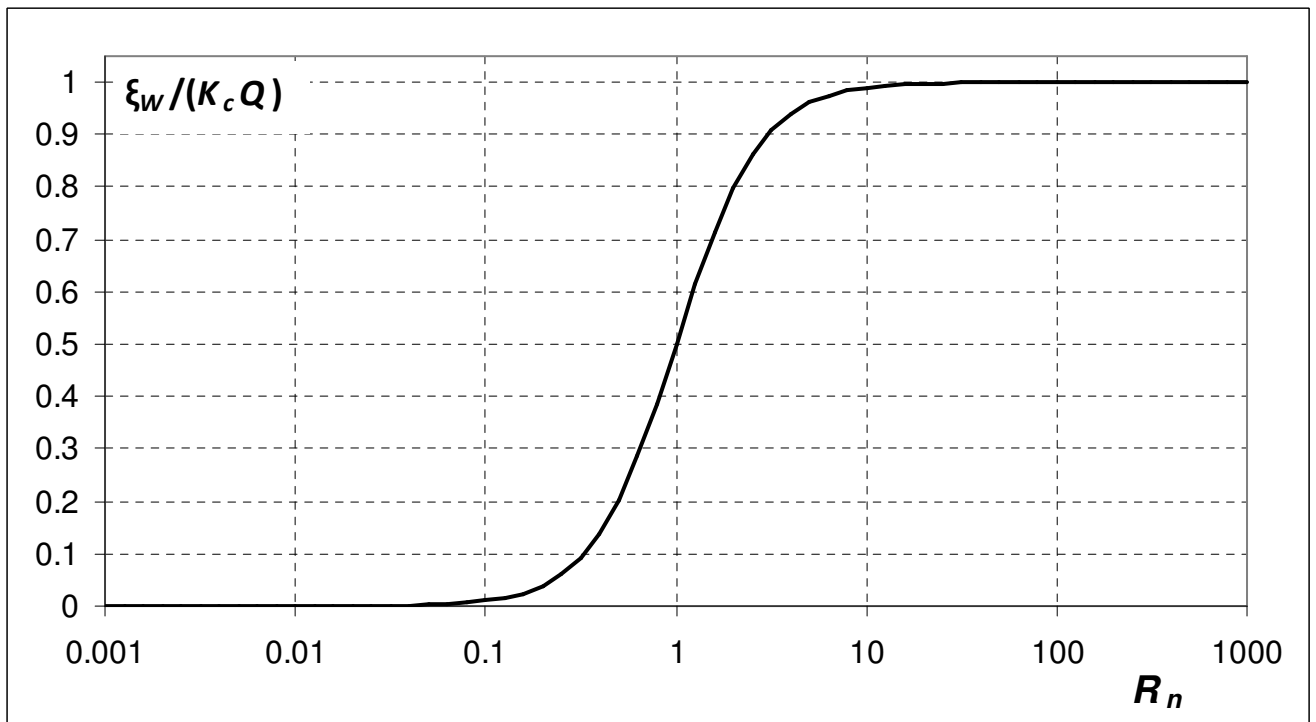


Рис. 3. Зависимость оптимальной расстройки ξ_W , нормированной на произведение $K_c Q$, от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

При $R_n \ll 1$ источник опрашивающего сигнала ведет себя подобно источнику напряжения, соответственно, максимальная энергия запасается при частоте опрашивающего сигнала, на которой в резонаторе развивается максимальный ток, т.е. вблизи частоты

последовательного резонанса. В этом случае $\xi_W \approx 0$, а $f_W \approx f_r$. При $R_n \gg 1$ источник опрашивающего сигнала ведет себя подобно источнику тока, соответственно, максимальная энергия запасается при частоте опрашивающего сигнала, на которой при протекании тока через резонатор на нем развивается максимальное напряжение, т.е. вблизи частоты параллельного резонанса. В этом случае $\xi_W \approx K_c Q$, а $f_W \approx f_a$. При $0,1 < R_n < 1$ оптимальная частота заметно отличается от f_r и f_a . При входном сопротивлении радиотехнического тракта, равном среднему геометрическому сопротивлений последовательного и параллельного резонанса, оптимальная частота равна среднему арифметическому частот последовательного и параллельного резонанса.

Выражение для максимальной запасенной в контуре энергии W_{\max} получаем, подставляя (15) в (13):

$$\begin{aligned} W_{\max} &\approx \frac{E_I^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2}{\frac{(R_N R_n)^2}{1+R_n^2} - 2 \frac{(R_N R_n)^2}{1+R_n^2} + R_N^2 + 2R_N + R_n^2 + 1} = \\ &= \frac{E_I^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2 (1+R_n^2)}{R_N^2 + 2R_N + R_n^2 + 1 + R_N^2 R_n^2 + 2R_N R_n^2 + R_n^4 + R_n^2 - (R_N R_n)^2} = \\ &= \frac{E_I^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2 (1+R_n^2)}{R_N^2 + 2R_N + 2R_n^2 + 1 + 2R_N R_n^2 + R_n^4} = \frac{E_I^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2 (1+R_n^2)}{(R_n^2 + K_c Q R_n + 1)^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для целей проводимого здесь анализа влияния параметров резонатора и радиотехнического тракта на их согласование будем полагать, что $\frac{E_I^2}{R_A} = \text{const}$. Это условие соответствует

неизменному значению максимально возможной мощности, которая может быть передана из радиотехнического тракта в присоединенную к нему нагрузку. Обозначим максимально возможную энергию, накопленную в резонаторе в установившемся режиме, W_{lim} . Она достигается при выполнении известного условия согласования импедансов, заключающегося в общем случае в том, что значения импеданса источника и нагрузки являются комплексно сопряженными величинами. При этом $U = \frac{E_I}{2}$, следовательно, максимальная мощность,

поступающая в нагрузку (контур) от источника $P_{\text{lim}} = \frac{U^2}{2R_A} = \frac{E_I^2}{8R_A}$. В установившемся режиме

мощность, поступающая в контур от источника равна рассеиваемой в нем мощности, которая в свою очередь связана с запасенной энергией через добротность. Добротность является отношением запасенной энергии к энергии, рассеиваемой за время, в течение которого фаза

изменяется на один радиан на резонансной частоте [1] (это время равно $\frac{1}{2\pi f_r} = \frac{1}{\omega_r}$), т.е.

$Q = \frac{\omega_r W_{\text{lim}}}{P_{\text{lim}}}$. Таким образом,

$$W_{\text{lim}} = \frac{QP_{\text{lim}}}{\omega_r} = \frac{E_I^2 Q}{8R_A \omega_r}. \quad (18)$$

Отношение W_{max} к W_{lim} можно назвать показателем эффективности накопления энергии, обозначим его η_W .

$$\eta_W = \frac{W_{\text{max}}}{W_{\text{lim}}} \approx \frac{E_I^2}{2} \frac{C_S K_c Q^2 (1 + R_n^2)}{(R_n^2 + K_c Q R_n + 1)^2} \frac{8R_A \omega_r}{E_I^2 Q} = 4 \frac{K_c Q R_n (1 + R_n^2)}{(R_n^2 + K_c Q R_n + 1)^2}. \quad (19)$$

Введем обозначения $\Delta_R = R_n + \frac{1}{R_n}$ и $\delta_R = \frac{\Delta_R}{K_c Q}$, использование которых позволяет представить

выражение (19) в компактной форме:

$$\eta_W = \frac{4R_n^2 K_c Q \left(\frac{1}{R_n} + R_n \right)}{\left[R_n \left(R_n + K_c Q + \frac{1}{R_n} \right) \right]^2} = \frac{4K_c Q \Delta_R}{(\Delta_R + K_c Q)^2} = \frac{4\delta_R}{(1 + \delta_R)^2} = \frac{4}{\left(\sqrt{\delta_R} + \frac{1}{\sqrt{\delta_R}} \right)^2}. \quad (20)$$

Параметр $\Delta_R \geq 2$, а параметр $\delta_R \geq \frac{2}{K_c Q}$. Поскольку $\Delta_R \left(\frac{1}{R_n} \right) = \Delta_R(R_n)$, а зависимость η_W от R_n

сводится к зависимости от Δ_R , то и $\eta_W \left(\frac{1}{R_n} \right) = \eta_W(R_n)$. Следовательно, график зависимости

$\eta_W(R_n)$, построенный в логарифмическом масштабе R_n , будет симметричен относительно линии

$R_n = 1$. Максимальное значение $\eta_W = 1$ достигается при $\delta_R = 1$, при больших или меньших

значениях δ_R знаменатель в выражении (12) больше 4, следовательно, $\eta_W < 1$. На рисунке 4

изображены графики зависимости η_W от δ_R для нескольких значений $K_c Q$. Кривые, соответствующие разным значениям $K_c Q$, накладываются друг на друга, но начинаются с

разных точек, соответствующих минимальному возможному значению $\delta_R = \frac{2}{K_c Q}$,

принимаемому при $\Delta_R = 2$, $R_n = 1$.

Если $K_c Q > 2$, то максимальное возможное значение $\eta_W = 1$ достигается при $\delta_R = 1$ (при

$\Delta_R = K_c Q$), т.е. при двух значениях $R_n = \frac{K_c Q \pm \sqrt{(K_c Q)^2 - 4}}{2}$; при $R_n = 1$ в этом случае существует

локальный минимум η_W . Если $K_c Q < 2$, то максимальное возможное значение $\eta_W = 1$ не

достигается; максимальное значение $\eta_w = \frac{8K_c Q}{(2 + K_c Q)^2}$ в этом случае достигается при $R_n = 1$ (при $\Delta_R = 2$), другие экстремумы отсутствуют. Достижение $\eta_w = 1$ показывает, что импеданс резонатора на оптимальной частоте является чисто активным. Следовательно, при $K_c Q \geq 2$ не имеет смысла использовать для увеличения запасаемой в резонаторе энергии дополнительные согласующие элементы или ограничивать выбор конструкции элементов радиотехнического тракта требованиями к значению реактивной составляющей его входного импеданса. Невозможность достигнуть предельной величины η_w ни при каком значении R_A в случае $K_c Q < 2$ говорит о наличии реактивной составляющей импеданса резонатора на любой частоте рассматриваемого диапазона. В этом случае достижение больших значений запасаемой в резонаторе энергии возможно при полной или частичной компенсации статической емкости, что в некотором роде эквивалентно увеличению K_c . Однако компенсирующие элементы имеют гораздо меньшую добротность, и, соответственно, будут вносить дополнительные потери энергии, так что их использование требует отдельного рассмотрения.

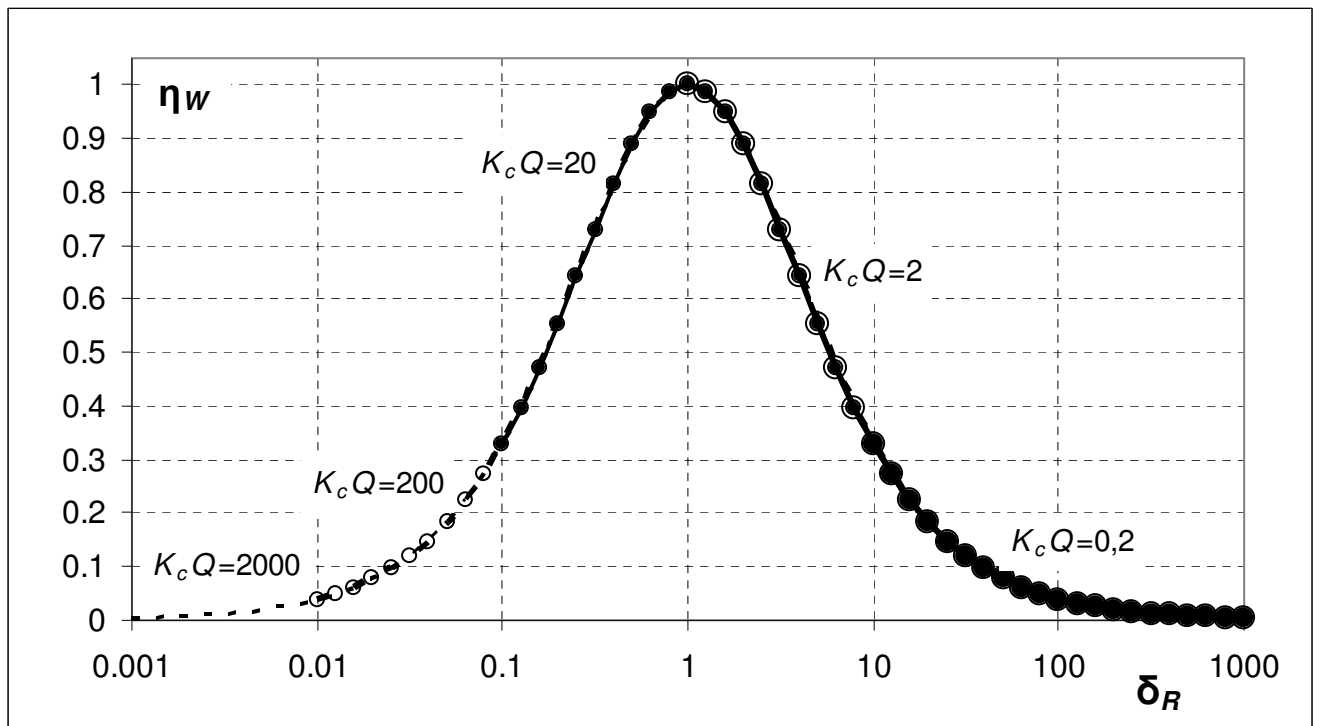


Рис. 4. Зависимость показателя эффективности накопления энергии η_w от параметра δ_R

Обозначим R_w наибольшее из значений R_n , при которых η_w максимально.

$$R_w = \begin{cases} 1, & K_c Q \leq 2 \\ \frac{K_c Q + \sqrt{(K_c Q)^2 - 4}}{2}, & K_c Q > 2 \end{cases} \quad (21)$$

Показатель эффективности накопления энергии в общем случае достигает максимального значения при двух значениях нормированного сопротивления: $R_n = R_W$ и $R_n = \frac{1}{R_W}$ (при $R_W = 1$, эти два значения совпадают).

$$\text{Если } K_c Q \gg 2, \text{ то } R_W \approx \frac{K_c Q + K_c Q \left[1 - \frac{2}{(K_c Q)^2} \right]}{2} = K_c Q \left[1 - \frac{1}{(K_c Q)^2} \right], \text{ следовательно,}$$

максимальное значение η_W достигается при $R_A \approx K_c Q \left[1 - \frac{1}{(K_c Q)^2} \right] r K_c Q = R \left[1 - \frac{1}{(K_c Q)^2} \right]$ или при

$$R_A \approx \frac{r K_c Q}{K_c Q \left[1 - \frac{1}{(K_c Q)^2} \right]} \approx r \left[1 + \frac{1}{(K_c Q)^2} \right]. \text{ Одно из оптимальных значений } R_A \text{ (при которых } \eta_W$$

достигает максимума) немного меньше значения R (приближается к нему с ростом $K_c Q$), при этом значение f_W близко к частоте параллельного резонанса. Другое оптимальное значение R_A немного превышает значение r (приближается к нему с ростом $K_c Q$), а значение f_W близко к частоте последовательного резонанса.

С уменьшением $K_c Q$ отличие оптимальных значений R_A от значений резонансных сопротивлений контура увеличивается, разница между парой оптимальных значений R_A уменьшается еще быстрее, чем разница между значениями резонансных сопротивлений (их отношение $\frac{R}{r} \approx (K_c Q)^2$). Отличие значений оптимальной частоты от значений резонансных

частот с уменьшением $K_c Q$ также увеличивается, а сами значения f_W , соответствующие максимумам η_W , приближаются друг другу. При $K_c Q = 2$ оба оптимальных значения R_A достигают среднего геометрического значений резонансных сопротивлений \sqrt{rR} (в данном случае оно вдвое превышает r и вдвое меньше, чем R). Оба значения f_W , соответствующие максимумам η_W , при этом достигают друг друга и среднего арифметического значений резонансных частот $\frac{f_r + f_a}{2}$. При дальнейшем уменьшении $K_c Q$ оптимальное значение R_A

остается равным \sqrt{rR} , а значение соответствующее ему значение f_W остается равным $\frac{f_r + f_a}{2}$.

Вышеописанные свойства зависимости η_W от параметров контура и радиотехнического тракта иллюстрируются рис. 5, на котором приведены графики зависимости η_W от R_n для нескольких значений $K_c Q$.

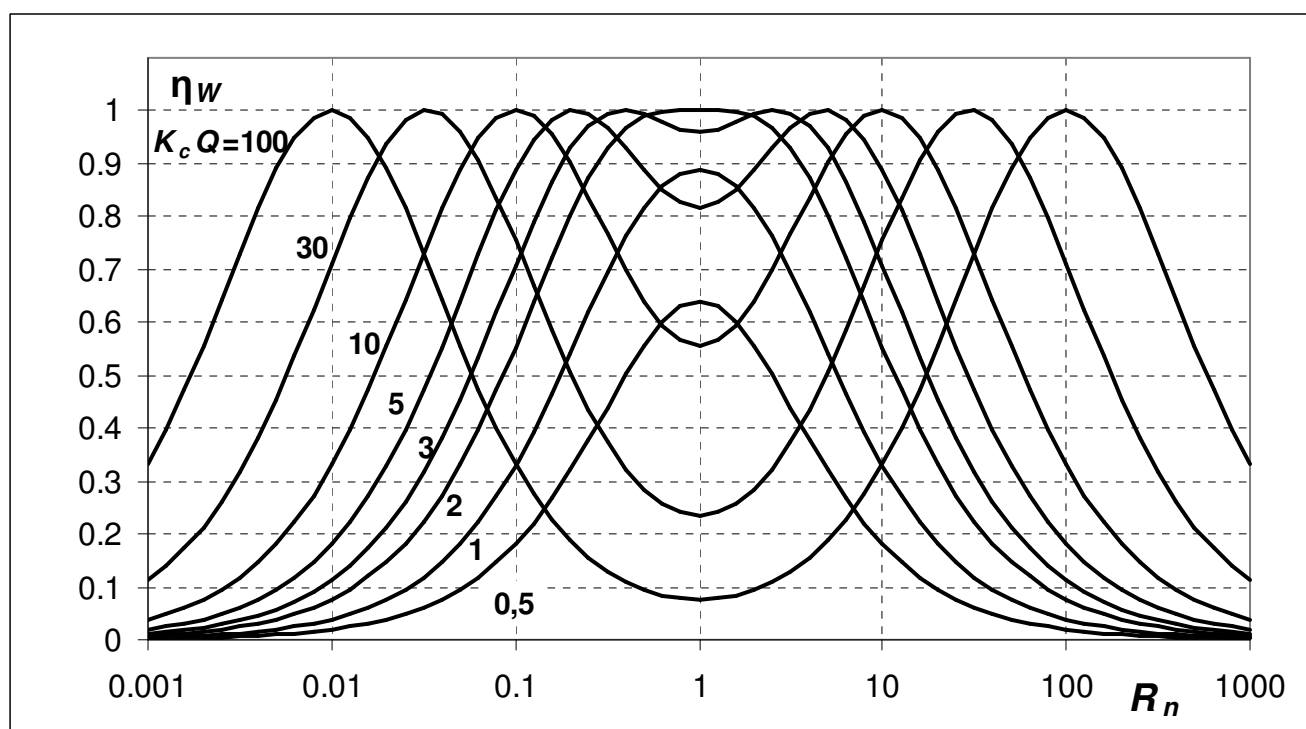


Рис. 5. Зависимость показателя эффективности накопления энергии η_w от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

При значениях $K_c Q$ около 10 и более, оптимальные значения входного сопротивления радиотехнического тракта почти не отличаются от значений сопротивления резонатора на резонансах; влияние на величину η_w изменения R_A от значений в несколько раз меньших оптимального до значений, превышающих его в несколько раз, выглядит почти одинаково для любого значения $K_c Q$. Более широкая область значений R_A , при которых η_w близко к 1, существует в области $K_c Q$, нижняя граница которой выше 2, а верхняя ниже 10 (более определенно о диапазоне $K_c Q$ можно говорить при конкретизации требований к значению η_w); например, если $K_c Q = 5$, то η_w не ниже 0,7 достигается при изменении R_A в диапазоне, максимальное значение в котором превышает минимальное более чем в 100 раз. Данное свойство полезно для использования в случаях, когда сопротивление непосредственно подключенной к резонатору антенны может сильно изменяться под влиянием окружающей ее среды и находящихся рядом с ней объектов. Кроме того, более широкий диапазон приемлемых значений входного сопротивления радиотехнического тракта полезен тем, что дает большую свободу в выборе конструкции его элементов (в частности, это позволяет выбирать антенну с лучшими характеристиками).

Рассматривая влияние параметров резонатора K_c и Q на эффективность накопления энергии в резонаторе по отдельности, следует отметить, что в случае $f_i = f_w$ влияние K_c полностью характеризуется подробно описанным выше влиянием произведения $K_c Q$.

Добротность Q помимо влияния на η_W через произведение $K_c Q$ влияет также и на W_{lim} , которая, согласно (18), прямо пропорциональна Q . Накопленная в резонаторе энергия $W_{max} = \eta_W W_{lim} \sim \eta_W (K_c Q) Q$. Реальное соотношение накопленной энергии и W_{lim} будет несколько меньше, чем η_W , за счет отличия частоты опрашивающего сигнала от оптимальной и за счет конечной длительности импульса; η_W следует рассматривать как максимально достижимую величину.

2.3. Зависимость энергии излученного датчиком сигнала от параметров радиотехнического тракта и резонатора

Процесс, протекающий в эквивалентной схеме, после окончания действия опрашивающего сигнала описывается уравнением свободных колебаний. Токи, протекающие через элементы эквивалентной схемы в процессе свободных колебаний, и действующие на них напряжения показаны на рис. 6.

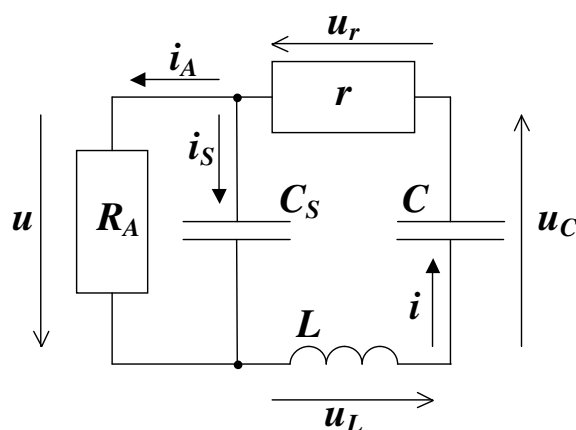


Рис. 6. Токи и напряжения в эквивалентной схеме при свободных колебаниях

Сумма мгновенных значений напряжений в замкнутом контуре равна нулю при любом значении времени t :

$$u_L(t) + u_C(t) + u_r(t) + u(t) = 0. \quad (22)$$

Напряжения на элементах схемы связаны с токами соотношениями: $u_L = Li'$; $u'_C = \frac{i}{C}$; $u_r = ri$; $u = R_A i_A$ (здесь и далее штрих обозначает производную по времени t). Продифференцируем обе части (22) и подставим в полученное уравнение выражения для напряжений:

$$u'_L + u'_C + u'_r + u' = Li'' + \frac{i}{C} + ri' + R_A i'_A = 0. \quad (23)$$

Подставим выражение, связывающее ток через статическую емкость с напряжением на ней $i_s = C_s u'$, в соотношение для токов $i = i_A + i_s$:

$$i = i_A + C_s u' = i_A + C_s R_A i'_A. \quad (24)$$

Подставляя (24) в (23) получаем уравнение для тока, протекающего через входное сопротивление радиотехнического тракта:

$$LC_s R_A i_A''' + Li_A'' + rC_s R_A i_A'' + ri_A' + R_A i_A' + \frac{C_s R_A i_A'}{C} + \frac{i_A}{C} = 0 \quad (25)$$

Разделим обе части (25) на L , а также учтем, что

$$C_s R_A = \frac{C}{K_c} r R_N \frac{1}{\omega_r^2 LC} = \frac{Cr}{K_c \omega_r LC} \frac{R_N}{\omega_r} = \frac{R_N}{K_c Q \omega_r} = \frac{R_n}{\omega_r}:$$

$$\begin{aligned} \frac{R_n}{\omega_r} i_A''' + \left(1 + \frac{r R_n}{L \omega_r}\right) i_A'' + \frac{r}{L} \left[1 + R_N \left(1 + \frac{1}{K_c}\right)\right] i_A' + \frac{i_A}{LC} = \\ = \frac{R_n}{\omega_r} i_A''' + \left(1 + \frac{R_n}{Q}\right) i_A'' + \omega_r \left[\frac{1}{Q} + R_n (1 + K_c)\right] i_A' + \omega_r^2 i_A = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Введем нормированное время $\tau = \omega_r t$. Производные по времени t связаны с производными по нормированному времени (далее будем обозначать их верхним индексом, заключенным в скобки) соотношением $\frac{\partial_n f(t)}{\partial t^n} = \omega_r^n \frac{\partial_n f(\tau)}{\partial \tau^n} = \omega_r^n f^{(n)}$. Разделив обе части (26) на ω_r^2 и заменив дифференцирование по t на дифференцирование по τ , получим следующее уравнение для $i_A(\tau)$:

$$R_n i_A^{(3)} + \left(1 + \frac{R_n}{Q}\right) i_A^{(2)} + \left[\frac{1}{Q} + R_n (1 + K_c)\right] i_A^{(1)} + i_A = 0. \quad (27)$$

Решение уравнение (27) имеет вид

$$i_A = A \cos(\tilde{\omega} \tau + \varphi_A) \exp(-\tilde{\alpha} \tau) + A_e \exp(-\tilde{\epsilon} \tau). \quad (28)$$

Значения $-\tilde{\alpha} \pm j\tilde{\omega}$ и $-\tilde{\epsilon}$ являются корнями полинома

$$P(x) = R_n x^3 + \left(1 + \frac{R_n}{Q}\right) x^2 + \left[\frac{1}{Q} + R_n (1 + K_c)\right] x + 1. \quad (29)$$

В общем случае полином может иметь и три действительных корня, однако реализация такого случая обозначала бы, что устройство с такими параметрами не может быть использовано в данной системе.

Диапазоны значений K_c и Q , соответствующие практически используемым резонаторам, описаны выше. Как показало численное решение уравнения (29) с различными значениями параметров из данных диапазонов и различными значениями R_n , значения частоты свободных колебаний $f_0 = \frac{\tilde{\omega} \omega_r}{2\pi}$ отличаются от значений f_W не более чем на 0,15%; значения $\tilde{\alpha}$ не

превышает 2,5%, следовательно, полоса части сигнала, соответствующей слагаемому $A \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_A) \exp(-\tilde{\alpha}\tau)$ не превышает 5% от центральной частоты. Наибольшие значения полосы достигаются при сочетании наибольших значений K_c и, следовательно, высоких значений $K_c Q$ с $R_n \approx 1$, что соответствует малым значениям η_W ; т.е. в большинстве случаев, интересных для практического применения, полоса сигнала значительно меньше 5%. Возможно, в некоторых случаях для получения более высокого соотношения сигнал – шум полосу пропускания приемника следует делать уже полосы сигнала. Однако без привязки к конкретной системе имеет смысл полагать энергию переизлученного сигнала равной полной энергии части сигнала, соответствующей слагаемому $A \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_A) \exp(-\tilde{\alpha}\tau)$. Получаемые таким способом значения энергии являются максимально достижимыми значениями энергии переизлученного сигнала.

Полученные при численном расчете зависимости параметров решения от параметров радиотехнического тракта и эквивалентного контура можно аппроксимировать следующими

выражениями: $\tilde{\omega} \approx F_W = \frac{K_c}{2} \frac{R_n^2}{1 + R_n^2} + 1$ (относительное отклонение не превышает 0,15%),

$$\tilde{\alpha} \approx \frac{1}{2Q} \left(\frac{K_c Q R_n}{1 + R_n^2 (1 + K_c)} + 1 \right) \quad (30)$$

(относительное отклонение не превышает 5%), $\tilde{\varepsilon} \approx \frac{1 + R_n^2}{[1 + R_n^2 (1 + K_c)] R_n}$ (относительное

отклонение не превышает 0,3%). Используя для определения начальных условий требования непрерывности напряжения на емкостях и тока, протекающего через индуктивность, можно выразить параметры A , φ_A и A_e через амплитуду и фазу тока, протекающего через индуктивность во время действия опрашивающего импульса. Значение амплитуды переизлученного сигнала A , возведенное в квадрат, состоит из двух слагаемых: зависящего от фазы опрашивающего импульса и не зависящего от нее. Величина зависящего от фазы слагаемого не превышает 5% от величины независящего от нее слагаемого, равной среднему значению A^2 (усредненному по диапазону значений фазы). Для вышеуказанных диапазонов значений K_c и Q получаем следующее приближенное выражение $A^2 \approx \frac{I^2}{1 + R_n^2 (1 + K_c)}$

(относительное отклонение от средних значений A^2 , полученных при численном расчете, не превышает 9%). Используя выражение (11) и соотношения, связывающие параметры контура, можно выразить A^2 через величину накопленной в контуре энергии:

$$A^2 \approx \frac{W}{1 + R_n^2 (1 + K_c)} \frac{2\omega_r}{Qr}. \quad (31)$$

Наибольшие значения относительного отклонения приближенных значений $\tilde{\alpha}$ и A^2 от точных значений достигаются при сочетании наибольших значений K_c и, следовательно, высоких значений $K_c Q$ с $R_n \approx 1$, что соответствует малым значениям η_W ; т.е. в большинстве случаев, интересных для практического применения, значения относительных отклонений существенно меньше максимальных значений.

Часть энергии, накопленной в контуре во время действия опрашивающего сигнала, в процессе свободных колебаний рассеивается в радиотехническом тракте, а часть на сопротивлении r . Полезной составляющей является часть рассеиваемой в радиотехническом тракте энергии, соответствующая части спектра, находящейся в рабочей полосе частот. Приближенно можно считать, что весь спектр части переизлученного сигнала, соответствующего слагаемому $A \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_A) \exp(-\tilde{\alpha}\tau)$, полностью находится в рабочей полосе частот, а весь спектр части сигнала, соответствующего слагаемому $A_e \exp(-\tilde{\epsilon}\tau)$, находится за ее пределами. Обозначим энергию полезной части сигнала E_A . Энергия, рассеиваемая в радиотехническом тракте, равна произведению его входного сопротивления на интеграл от квадрата протекающего через него тока:

$$\begin{aligned} E_A &= R_A \int_0^{\infty} i_A^2 dt = \frac{R_A}{\omega_r} \int_0^{\infty} i_A^2 d\tau = \frac{R_A}{\omega_r} \int_0^{\infty} A^2 \cos^2(\tilde{\omega}\tau + \varphi_A) \exp(-2\tilde{\alpha}\tau) d\tau = \\ &= \frac{A^2 R_A}{\omega_r} \int_0^{\infty} \frac{1 + \cos(2\tilde{\omega}\tau + 2\varphi_A)}{2} \exp(-2\tilde{\alpha}\tau) d\tau = \\ &= \frac{A^2 R_A}{\omega_r} \left\{ \frac{1}{4\tilde{\alpha}} + \frac{\tilde{\alpha} \cos(2\varphi_A) + \tilde{\omega} \sin(2\varphi_A)}{4(\tilde{\alpha}^2 + \tilde{\omega}^2)} \right\} \approx \frac{A^2 R_A}{4\tilde{\alpha}\omega_r}. \end{aligned} \quad (32)$$

Подставляя (30) и (31) в (32) получаем выражение

$$\begin{aligned} E_A &= \frac{W}{1 + R_n^2(1 + K_c)} \frac{2\omega_r}{Qr} \frac{2Q}{\left(\frac{K_c QR_n}{1 + R_n^2(1 + K_c)} + 1 \right)} \frac{R_A}{4\omega_r} = \\ &= W \frac{R_N}{1 + R_n^2(1 + K_c) + K_c QR_n} \approx W \frac{R_N}{1 + R_n^2 + K_c QR_n} = W \frac{K_c Q}{\Delta_R + K_c Q} = W \frac{1}{\delta_R + 1}. \end{aligned} \quad (33)$$

Отношение E_A к W можно назвать КПД излучения энергии, обозначим его η_E .

$$\eta_E = \frac{E_A}{W} \approx \frac{1}{1 + \delta_R}. \quad (34)$$

Для вышеуказанных диапазонов значений K_c , Q и значений R_n , при которых η_W превышает 0,3, относительное отклонение приближенных значений E_A от значений, полученных при численном расчете, не превышает 10%; максимальные значения относительного отклонения не превышают значений K_c .

На рисунке 7 изображены графики зависимости η_E от δ_R для нескольких значений $K_c Q$. Кривые, соответствующие разным значениям $K_c Q$, накладываются друг на друга, но начинаются с разных точек, соответствующих минимальному возможному значению

$\delta_R = \frac{2}{K_c Q}$, принимаемому при $\Delta_R = 2$, $R_n = 1$. Максимальное значение η_E достигается при

минимальном значении $\delta_R = \frac{2}{K_c Q}$, другие экстремумы отсутствуют. Максимальное значение

$$\eta_E = \frac{1}{1 + \frac{2}{K_c Q}} = \frac{K_c Q}{K_c Q + 2}.$$

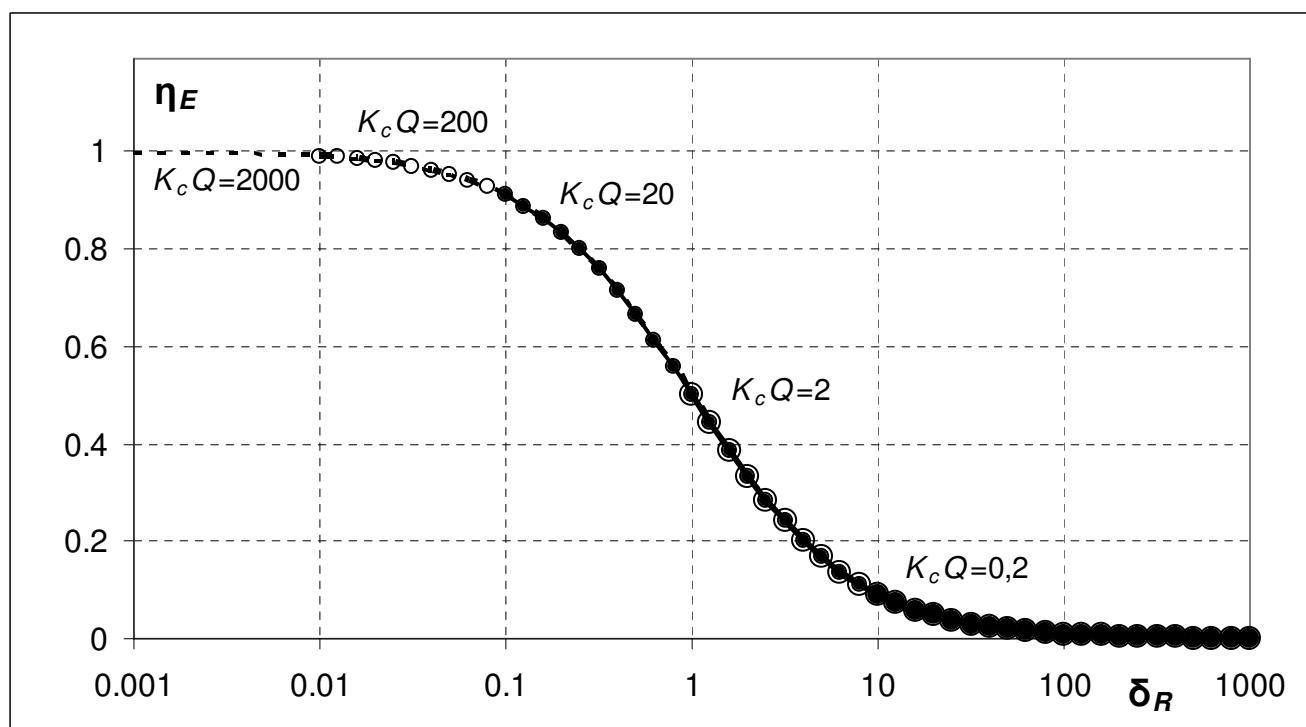


Рис. 7. Зависимость КПД излучения энергии η_E от параметра δ_R .

Графики зависимости $\eta_E(R_n)$ при различных значениях $K_c Q$ приведены на рис. 8. Для достижения высоких значений η_E величина произведения $K_c Q$ более важна, чем для достижения высоких значений η_W . Например, для того чтобы достичь величины $\eta_E = 0,7$ требуется $K_c Q \approx 5$ или выше. С ростом $K_c Q$ значения η_E асимптотически приближаются к единице, при этом скорость роста η_E с ростом $K_c Q$ снижается. При значениях произведения $K_c Q \approx 30$ и выше его увеличение позволяет получить выигрыш в величине η_E , не превышающий нескольких процентов.

С ростом $K_c Q$ также наблюдается уплощение вершины графика зависимости $\eta_E(R_n)$, что позволяет получить более широкую область значений R_A , при которых значение η_E близко к 1. Преимущества наличия такой области обсуждались выше применительно к η_W . Для получения

определенного диапазона значений R_A , в котором η_E принимает значения не ниже заданного, требуется, чтобы произведение $K_c Q$ было не менее определенного значения. Для данной цели может иметь смысл выбор и более высоких значений $K_c Q$, чем для получения высокого η_E значения при одном значении R_A .

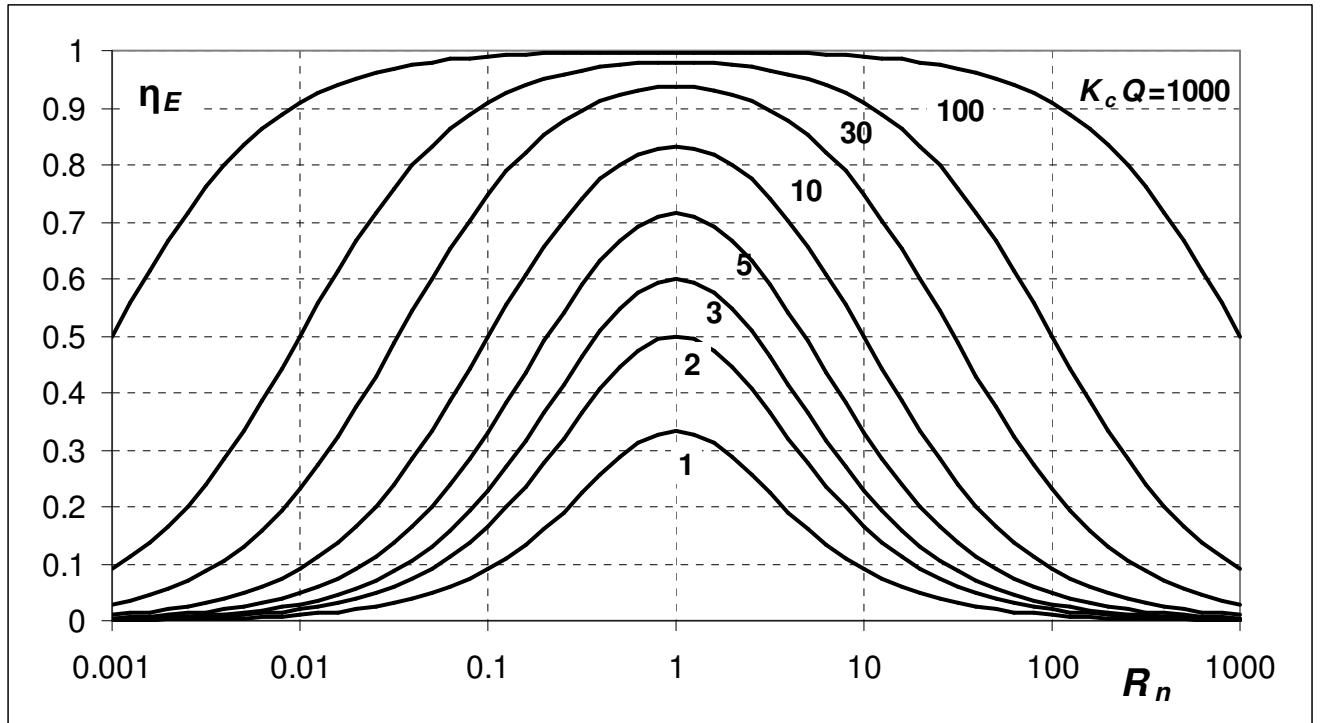


Рис. 8. Зависимость КПД излучения энергии η_E от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

В случае $K_c Q > 2$ при $R_n = R_W$ и $R_n = 1/R_W$ (при этом $\eta_W = 1$, а $\delta_R = 1$) $\eta_E = 0,5$. В случае $K_c Q \leq 2$ при $R_n = R_W = 1$ достигается как максимальное значение η_E , так и максимальное значение η_W ; при $K_c Q = 2$ максимальное значение $\eta_E = 0,5$, при меньших значениях $K_c Q$ оно меньше 0,5 (η_W при этом и не достигает 1). Таким образом, одновременное достижение высоких значений η_W и η_E невозможно.

2.4. Зависимость эффективности переизлучения энергии от параметров радиотехнического тракта и резонатора

В конечном итоге интерес представляет произведение η_W и η_E , которое можно назвать показателем эффективности переизлучения энергии $\eta = \eta_W \eta_E = \frac{E_A}{W_{\text{lim}}}$. Подставив в произведение выражения (20) и (34) получаем

$$\eta = \frac{4\delta_R}{(1+\delta_R)^2} \frac{1}{1+\delta_R} = \frac{4\delta_R}{(1+\delta_R)^3}. \quad (35)$$

На рисунке 9 изображены графики зависимости η от δ_R для нескольких значений $K_c Q$. Кривые, соответствующие разным значениям $K_c Q$, накладываются друг на друга, но начинаются с разных точек, соответствующих минимальному возможному значению $\delta_R = \frac{2}{K_c Q}$, принимаемому при $\Delta_R = 2, R_n = 1$.

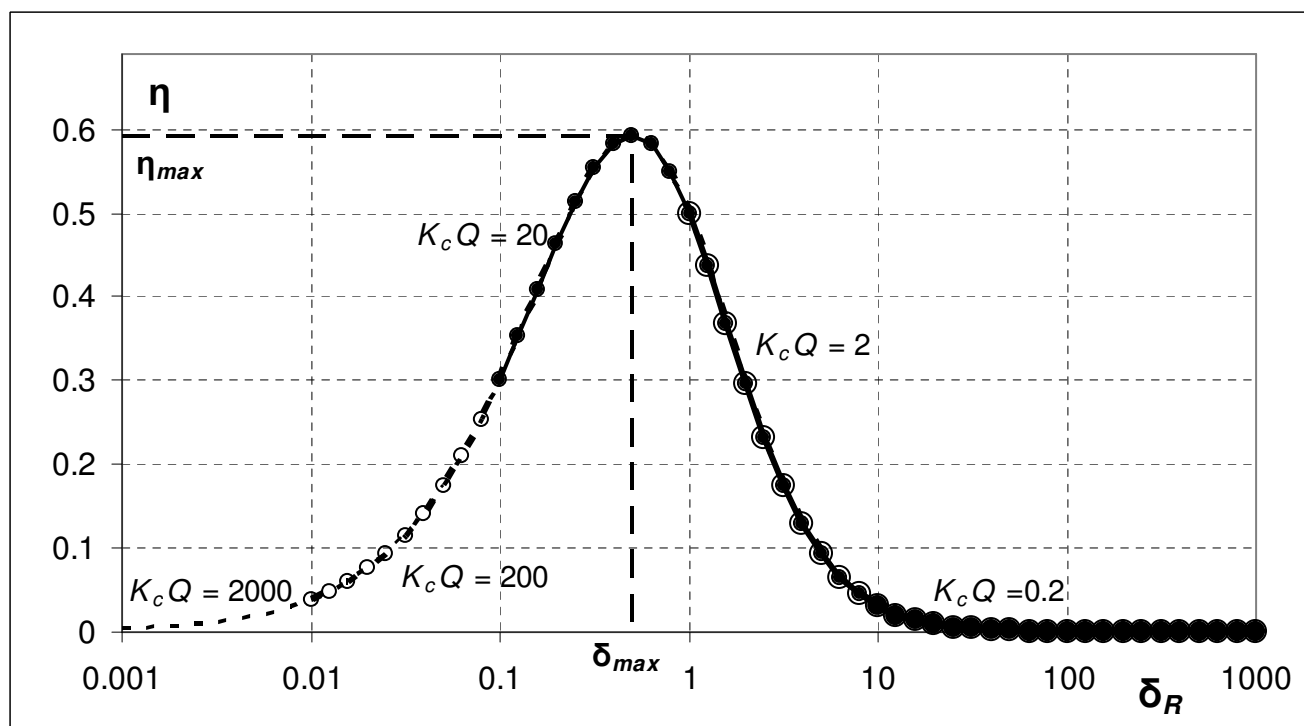


Рис. 9. Зависимость показателя эффективности переизлучения энергии η от параметра δ_R .

Отмеченные на графике значения η_{max} (максимально возможное значение η) и δ_{max} (значение параметра δ , при котором оно достигается) можно найти, решив уравнение

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial \delta} \right|_{\delta_R = \delta_{max}} = 4 \left[\frac{1}{(1 + \delta_{max})^3} - \frac{3\delta_{max}}{(1 + \delta_{max})^4} \right] = 4 \frac{1 - 2\delta_{max}}{(1 + \delta_{max})^4} = 0. \quad (36)$$

Решением уравнения (36) является $\delta_{\max} = 0,5$; следовательно $\eta_{\max} = \frac{4\delta_{\max}}{(1+\delta_{\max})^3} = \frac{2}{1,5^3} \approx 0,6$.

Если $K_c Q > 4$, то максимальное значение $\eta = \eta_{\max}$ достигается при $\delta_R = 0,5$ (при

$$\Delta_R = \frac{K_c Q}{2}), \text{ т.е. при двух значениях } R_n = \frac{\frac{K_c Q}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{K_c Q}{2}\right)^2 - 4}}{2} = \frac{K_c Q \pm \sqrt{(K_c Q)^2 - 16}}{4}; \text{ при } R_n = 1$$

в этом случае существует локальный минимум η . Если $K_c Q < 4$, то η не достигает η_{\max} , а его максимальное значение

$$\eta_m = \frac{8(K_c Q)^2}{(2 + K_c Q)^3} \quad (37)$$

в этом случае достигается при $R_n = 1$ (при $\Delta_R = 2$), другие экстремумы отсутствуют.

Обозначим R_{\max} наибольшее из значений R_n , при которых η максимально.

$$R_{\max} = \begin{cases} 1, & K_c Q \leq 4 \\ \frac{K_c Q + \sqrt{(K_c Q)^2 - 16}}{4}, & K_c Q > 4 \end{cases} \quad (38)$$

Показатель эффективности переизлучения энергии в общем случае достигает максимального значения при двух значениях нормированного сопротивления: $R_n = R_{\max}$ и $R_n = \frac{1}{R_{\max}}$ (при $R_{\max} = 1$, эти два значения совпадают). Данные значения R_n можно называть оптимальными значениями нормированного сопротивления.

$$\text{Если } K_c Q \gg 4, \text{ то } R_{\max} \approx \frac{K_c Q + K_c Q \left[1 - \frac{8}{(K_c Q)^2}\right]}{4} = \frac{K_c Q}{2} \left[1 - \left(\frac{2}{K_c Q}\right)^2\right], \text{ следовательно,}$$

$$\text{максимальное значение } \eta \text{ достигается при } R_A \approx \frac{K_c Q}{2} \left[1 - \left(\frac{2}{K_c Q}\right)^2\right] r K_c Q = \frac{R}{2} \left[1 - \left(\frac{2}{K_c Q}\right)^2\right] \text{ или}$$

$$\text{при } R_A \approx \frac{r K_c Q}{\frac{K_c Q}{2} \left[1 - \left(\frac{2}{K_c Q}\right)^2\right]} \approx 2r \left[1 + \left(\frac{2}{K_c Q}\right)^2\right]. \text{ Одно из оптимальных значений } R_A \text{ (при которых}$$

η достигает максимума) с ростом $K_c Q$ приближается к деленному на два значению R , при этом значение f_0 приближается к частоте параллельного резонанса. Другое оптимальное значение R_A с ростом $K_c Q$ приближается к удвоенному значению r , при этом значение f_0 приближается к частоте последовательного резонанса.

С уменьшением $K_c Q$ отличие оптимальных значений R_A от значений резонансных сопротивлений контура увеличивается, разница между парой оптимальных значений R_A

уменьшается еще быстрее, чем разница между значениями резонансных сопротивлений. Отличие значений частот свободных колебаний от значений резонансных частот также увеличивается, и сами значения f_0 , соответствующие максимумам η , приближаются друг другу. При $K_c Q = 4$ оба оптимальных значения R_A достигают среднего геометрического значений резонансных сопротивлений \sqrt{rR} (в данном случае оно вчетверо превышает r и вчетверо меньше, чем R). Оба значения f_0 , соответствующие максимумам η , при этом приближаются к среднему арифметическому значений резонансных частот $\frac{f_r + f_a}{2}$. При дальнейшем уменьшении $K_c Q$ оптимальное значение R_A остается равным \sqrt{rR} , а соответствующее ему значение f_0 остается близким к $\frac{f_r + f_a}{2}$.

Вышеописанные свойства зависимости η от параметров эквивалентного контура и радиотехнического тракта иллюстрируются рис. 10, на котором приведены графики зависимости η от R_n для нескольких значений $K_c Q$. При значениях $K_c Q$ около 20 и более, оптимальные значения входного сопротивления радиотехнического тракта почти не отличаются от значений $2r$ или $\frac{R}{2}$; при этом изменение изменения R_A от значений в несколько раз меньших оптимального до значений превышающих его в несколько раз влияет на величину η почти одинаково для любого значения $K_c Q$.

Более широкая область значений R_A , при которых η близко к η_{\max} , существует в области $K_c Q$, нижняя граница которой выше 4, а верхняя ниже 20 (более определенно о диапазоне $K_c Q$ можно говорить при конкретизации требований к значению η); например, если $K_c Q = 10$, то η не ниже 0,45 достигается при изменении R_A в диапазоне, максимальное значение в котором превышает минимальное более чем в 100 раз. Как указывалось выше, данное свойство полезно для использования в случаях, когда сопротивление непосредственно подключенной к резонатору антенны может сильно изменяться под влиянием окружающей ее среды и находящихся рядом с ней объектов.

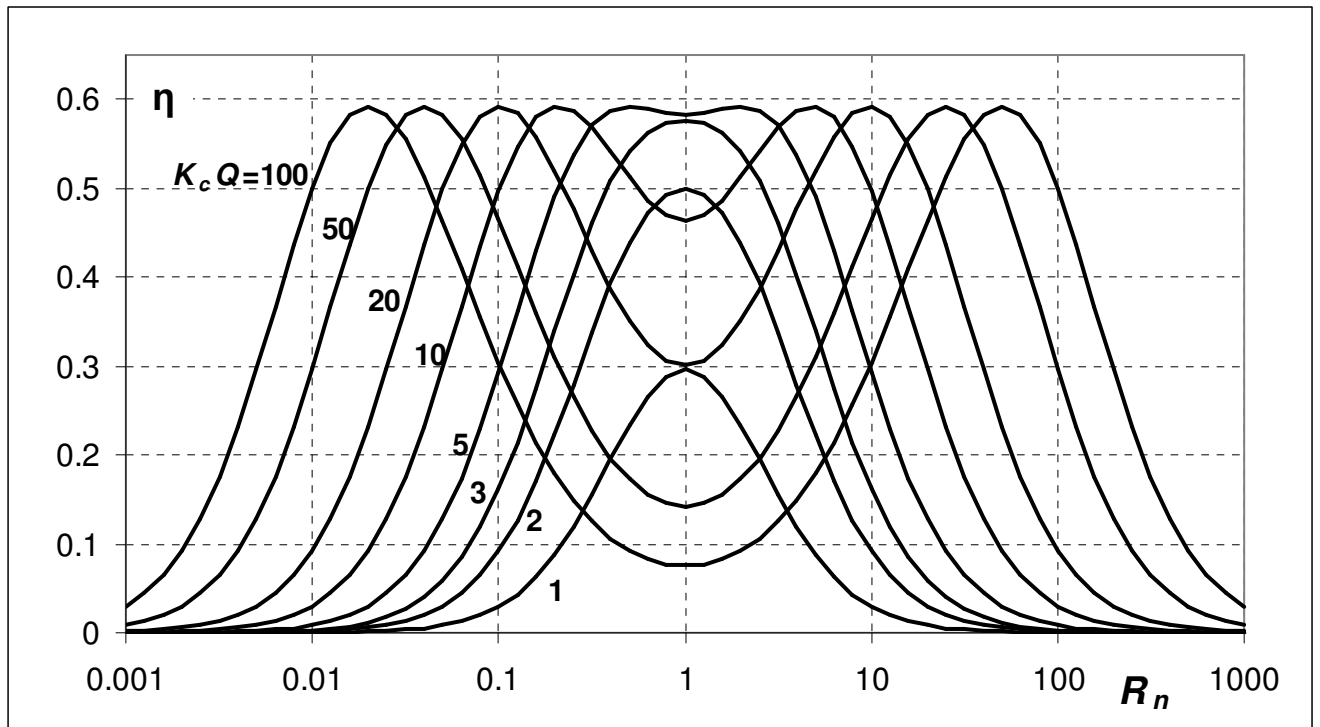


Рис. 10. Зависимость показателя эффективности переизлучения энергии η от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

На рисунке 11 приведены графики зависимости $\eta(R_n)$ в области значений η , превышающих 0,4 при нескольких значениях $K_c Q$ из диапазона от 2 до 20, более подробно демонстрирующие зависимость η от R_n и $K_c Q$ при значениях этих параметров, наиболее интересных с практической точки зрения. При меньших значениях $K_c Q$ невозможно достижение значений η , близких к η_{\max} . Хотя значения $K_c Q > 20$ также интересны для практического использования, соответствующие им графики зависимости $\eta(R_n)$ не приводятся на данном рисунке, поскольку в области $\eta > 0,4$ все они имеют вид подобный графику для $K_c Q = 20$: два пика, вершины которых достигаются при значениях R_n , близких к $\frac{2}{K_c Q}$ и $\frac{K_c Q}{2}$.

Данный рисунок дает более четкое представление о том, в каком диапазоне изменения R_n могут достигаться значения η не ниже некоторого уровня при том или ином значении произведения $K_c Q$.

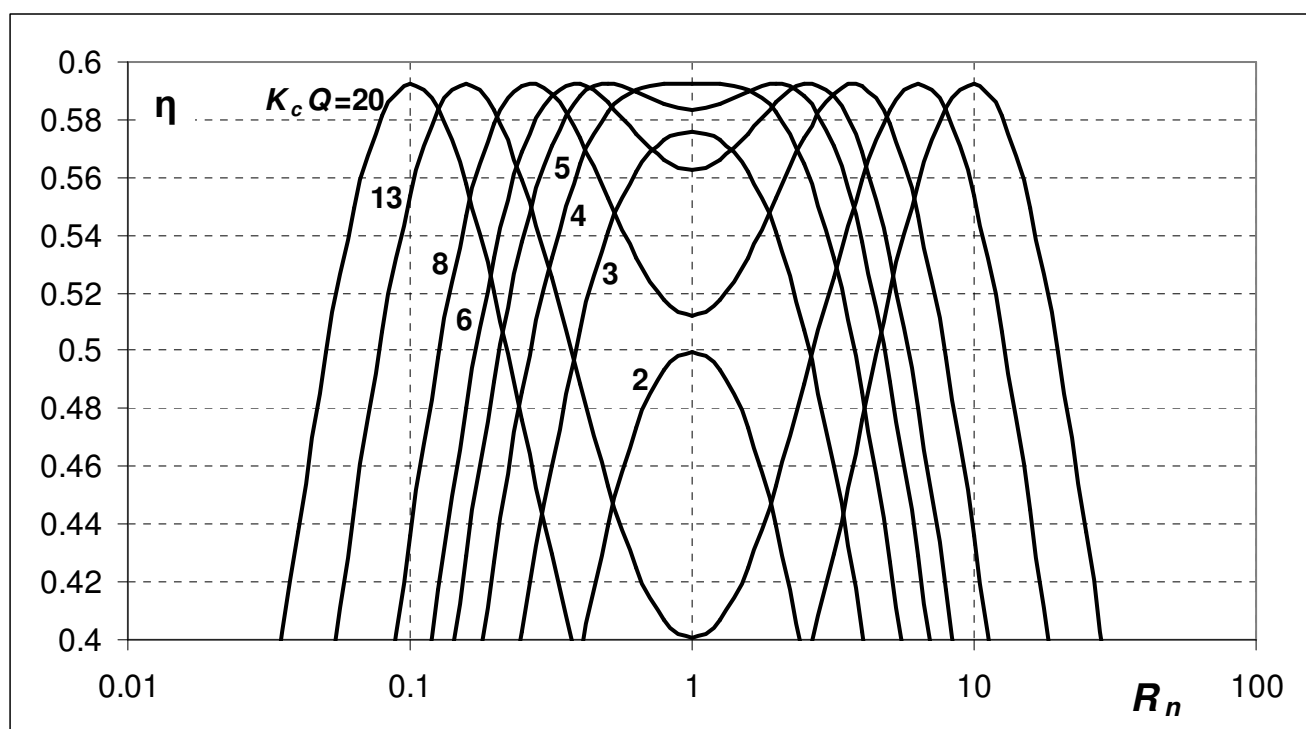


Рис. 11. Зависимость показателя эффективности переизлучения энергии η от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n при $2 \leq K_c Q \leq 20$

На рисунке 12 приведены графики зависимости R_{\max} и $\frac{1}{R_{\max}}$ от произведения $K_c Q$. График, построенный в логарифмическом масштабе, отображает изменение R_{\max} при изменении $K_c Q$ в широком диапазоне. При значениях $K_c Q$, изменяющихся в диапазоне от 4 до 20, $R_{\max} > 1$ и при этом заметно отличается от $\frac{K_c Q}{2}$. Для данного диапазона изменения $K_c Q$ приведены графики в линейном масштабе.

Хотя использование резонаторов, характеризующихся $K_c Q \approx 4$ и выше, является предпочтительным с точки зрения достижения максимальной эффективности переизлучения энергии, в ряде случаев резонаторы с меньшими значениями $K_c Q$ имеют другие характеристики, делающие их использование предпочтительным по иным причинам. Также надо заметить, что при использовании более высоких рабочих частот, добротность резонаторов достигает меньших значений, что делает достижение $K_c Q \approx 4$ возможным в меньшем числе случаев, чем при более низких рабочих частотах. На рисунке 13 приведен график зависимости максимального значения η от произведения $K_c Q$, значения которого меньше 4. В этом случае $\eta < \eta_{\max}$, а его максимальное значение η_m определяется выражением (37). Данный график показывает, какое максимальное значение η может быть достигнуто без использования согласующих элементов при том или ином значении произведения $K_c Q$.

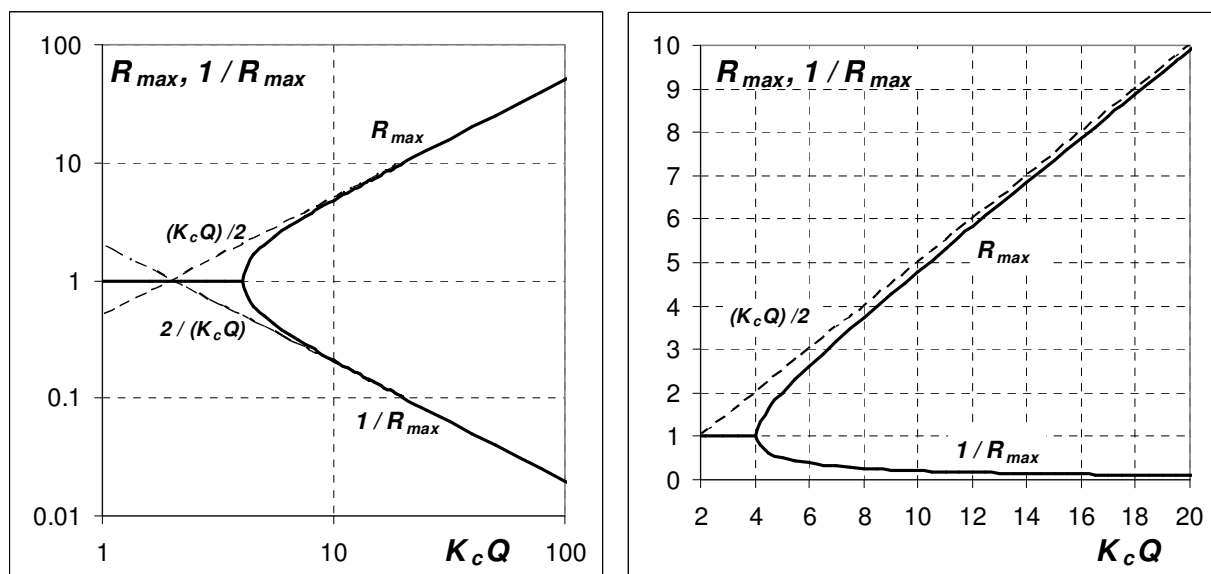


Рис. 12. Зависимость оптимальных значений нормированного сопротивления R_{max} и $1/R_{max}$ от произведения $K_c Q$

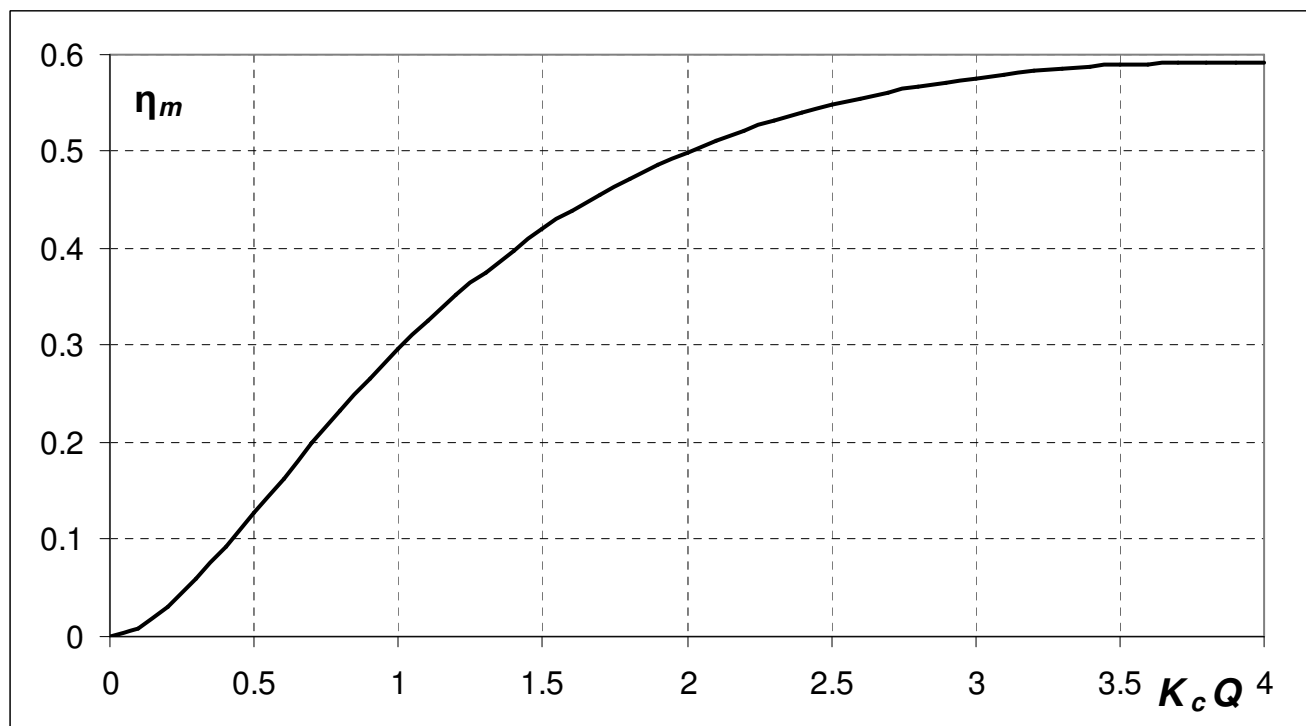


Рис. 13. Зависимость максимального значения показателя эффективности переизлучения энергии η_m от произведения $K_c Q$ (при $K_c Q < 4$)

Рассматривая влияние параметров резонатора K_c и Q на эффективность переизлучения энергии по отдельности, следует отметить, что в случае $f_l = f_w$ влияние K_c полностью характеризуется подробно описанным выше влиянием произведения $K_c Q$. Добротность Q помимо влияния на η через произведение $K_c Q$ влияет также и на W_{lim} , которая, согласно (10), прямо пропорциональна Q . Энергия переизлученного импульса $E_A = \eta W_{lim} \sim \eta(K_c Q)Q$. Таким

образом, использование резонаторов с более высокой добротностью позволяет получить отклик с большей энергией за счет большей величины накопленной энергии. Пока произведение $K_c Q$ не достигает 4, энергия отклика растет с ростом добротности быстрее, чем сама добротность, поскольку в этом случае рост энергии отклика обусловлен как ростом накопленной энергии, так и ростом эффективности переизлучения. Повышение коэффициента связи приводит к росту энергии отклика только за счет увеличения эффективности переизлучения и только до тех пор, пока произведение $K_c Q$ не достигает 4.

2.5. Сравнение результатов приближенного расчета и численного расчета

Примеры частотных характеристик резонаторов на ПАВ, рассчитанных методом связанных мод, и частотных характеристик соответствующих им колебательных контуров приведены на рис. 14. Параметры эквивалентных колебательных контуров определены по рассчитанным характеристикам резонаторов вблизи последовательного резонанса. Слева и справа показаны характеристики двух резонаторов, спроектированных для двух разных подложек из кварца. Как видно на рисунке, кривые практически совпадают вблизи частоты последовательного резонанса. При некотором удалении от нее существуют заметные отличия характеристик резонаторов от характеристик эквивалентных контуров; области, в которых эти отличия наиболее заметны, более подробно показаны на вставках.

Частотные характеристики вычисляются в программе для дискретного набора значений частоты, применение к ним дискретного преобразования Фурье позволяет получить временные характеристики для дискретного набора значений времени. Опрашивающий сигнал и его спектр также представляются в дискретном виде. Интегрирование применительно к дискретному сигналу выполняется в виде суммирования его значений и умножение суммы на шаг дискретизации. Для расчета использовалось 2^{20} дискретных значений времени и, соответственно, вдвое меньше, 2^{19} дискретных значений частоты. Шаг дискретизации во временной области Δt выбран равным одной десятой периода опрашивающего сигнала T_I ,

$\Delta t = \frac{T_I}{10} = \frac{1}{10f_I}$; максимальное значение времени $t_{\max} = \frac{2^{20}}{10f_I} \approx 10^5 T_I$. Шаг дискретизации по

частоте $\Delta f = \frac{1}{t_{\max}} = \frac{10f_I}{2^{20}} \approx \frac{f_I}{10^5}$, максимальное значение частоты составляет $5f_I$.

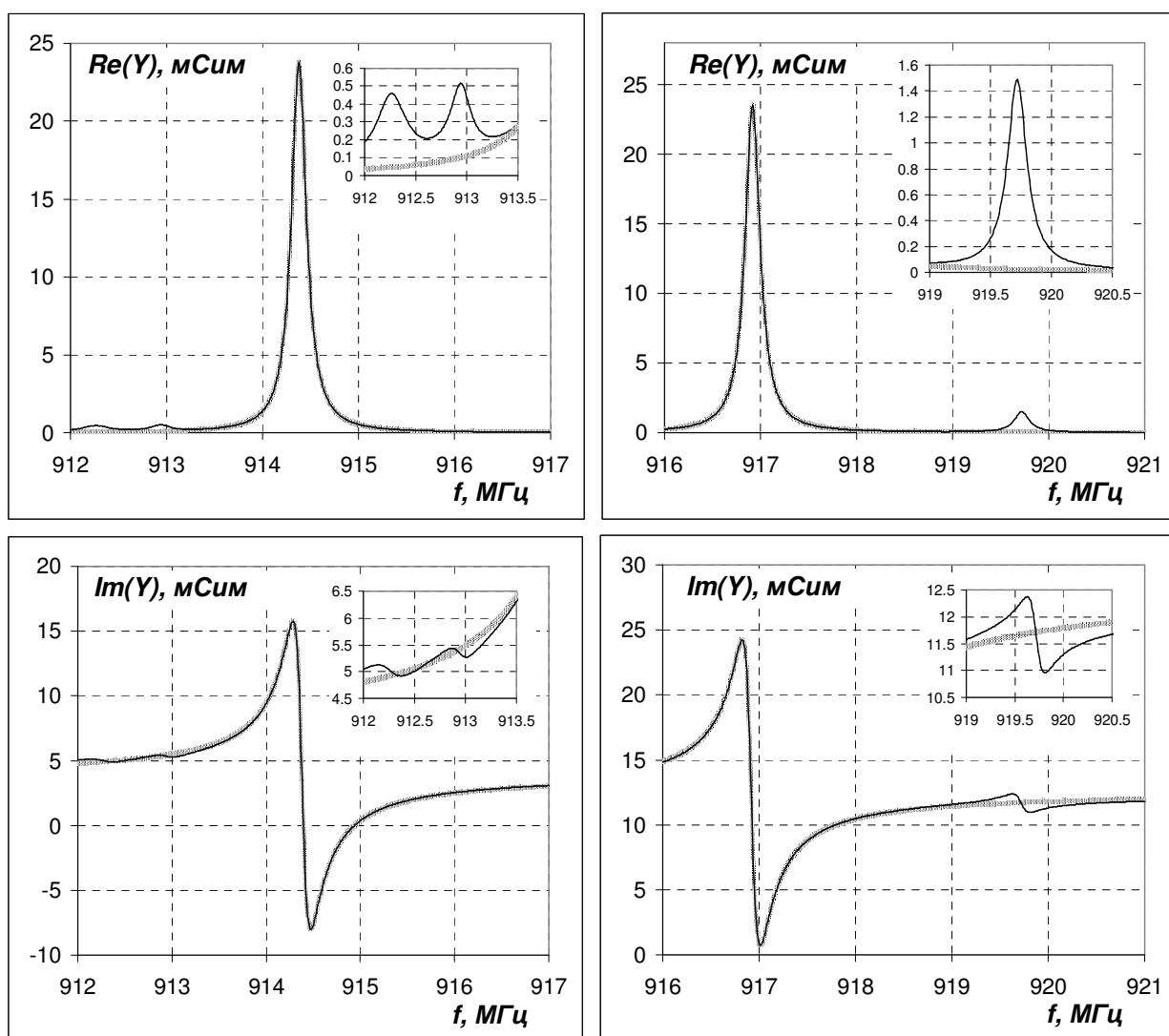


Рис. 14. Расчетная зависимость комплексной проводимости Y резонатора на ПАВ (тонкие черные линии) и эквивалентного колебательного контура (толстые серые линии) от частоты f для двух разных резонаторов

Для проверки корректности выбора длительности опрашивающего импульса t_I и значения максимального времени применительно к расчету максимально возможного значения энергии переизлученного сигнала были проведены расчеты энергии переизлученного сигнала E_A с разными значениями t_I и изменяющимся верхним пределом интегрирования t_E . Их результаты показали, что при различных значениях параметров резонатора и радиотехнического тракта выбранное значение $t_I = 3 \cdot 10^4 T_I$ превышает время, за которое накопленная в резонаторе энергия практически достигает установившегося значения. $t_{\max} \approx 10^5 T_I$ превышает значения времени, при которых практически заканчивается процесс свободных колебаний. На рисунке 15 показаны примеры графиков зависимости E_A от t_I (построенной при $t_E = t_{\max}$) зависимости E_A от t_E (построенной при $t_I = 3 \cdot 10^4 T_I$) для резонатора с добротностью около $5 \cdot 10^3$.

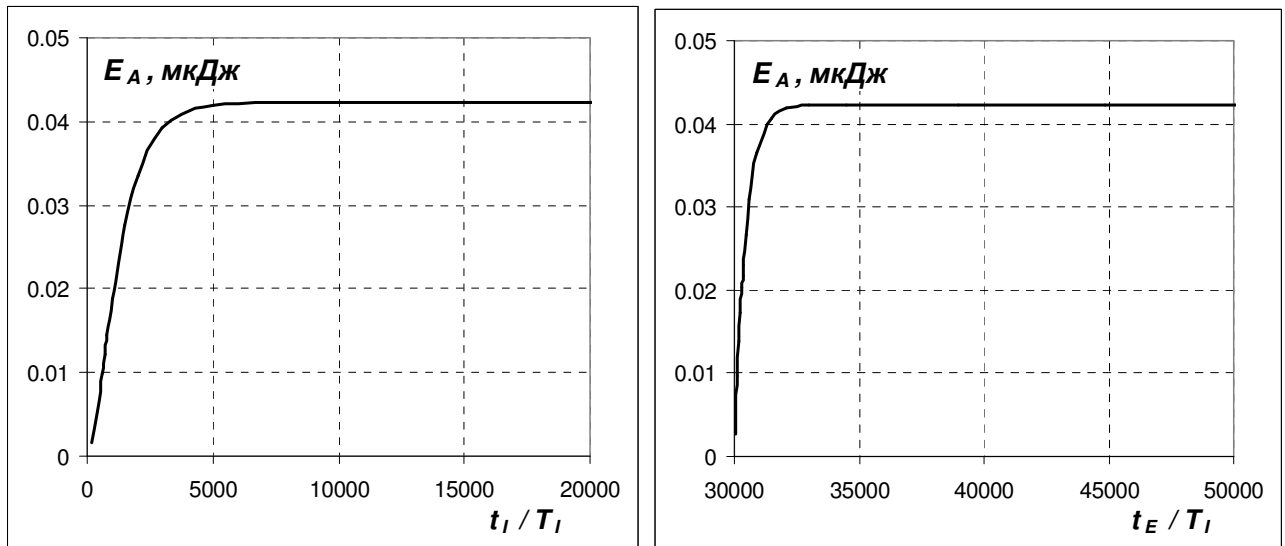


Рис. 15. Зависимость расчетного значения энергии переизлученного сигнала E_A от длительности опрашивающего импульса t_I (слева) и от верхнего предела интегрирования t_E (справа), нормированных на период опрашивающего импульса T_I

Для проверки корректности использования выражения для оптимальной частоты (16) применительно к резонатору на ПАВ были проведены расчеты значений E с разными значениями f_I при различных значениях параметров резонатора и радиотехнического тракта. Рисунок 16 демонстрирует примеры сравнения результатов данного расчета с зависимостями $E_A(f_I)$ для эквивалентных колебательных контуров. Значения E_A на графиках нормированы к $E_A(f_W)$. Кривые для эквивалентных контуров построены с использованием выражений (13) и (17). Как видно на рисунке, форма зависимости $E_A(f_I)$ для резонаторов практически повторяет форму этой зависимости для эквивалентных контуров. Таким образом, выбор f_W в качестве значения частоты опрашивающего сигнала для дальнейшего расчета энергии отклика позволяет получить значения E_A , достаточно близкие к максимальным.

На рисунке 17 показаны примеры зависимости энергии переизлученного сигнала от R_n для двух различных резонаторов с резонансной частотой около 915 МГц. Значения E_A для резонатора получены вышеописанным способом с частотой опрашивающего сигнала равной f_W , вычисленной в соответствии с (16) по параметрам контура, определенным по частотной характеристике резонатора. При расчетах полагается, что отношение квадрата амплитуды ЭДС эквивалентного источника опрашивающего сигнала к входному сопротивлению радиотехнического тракта $\frac{E_I^2}{R_A} = 1 \text{ В}^2/\text{Ом}$ (т.е. при согласовании импедансов в установившемся

режиме мощность, передаваемая из источника в резонатор, составляет 0,125 Вт). Значения E_A для эквивалентных колебательных контуров вычисляются как произведение W_{lim} на η , которые

рассчитываются с использованием выражений (18) и (35), соответственно. Значения, вычисленные разными способами, практически не отличаются.

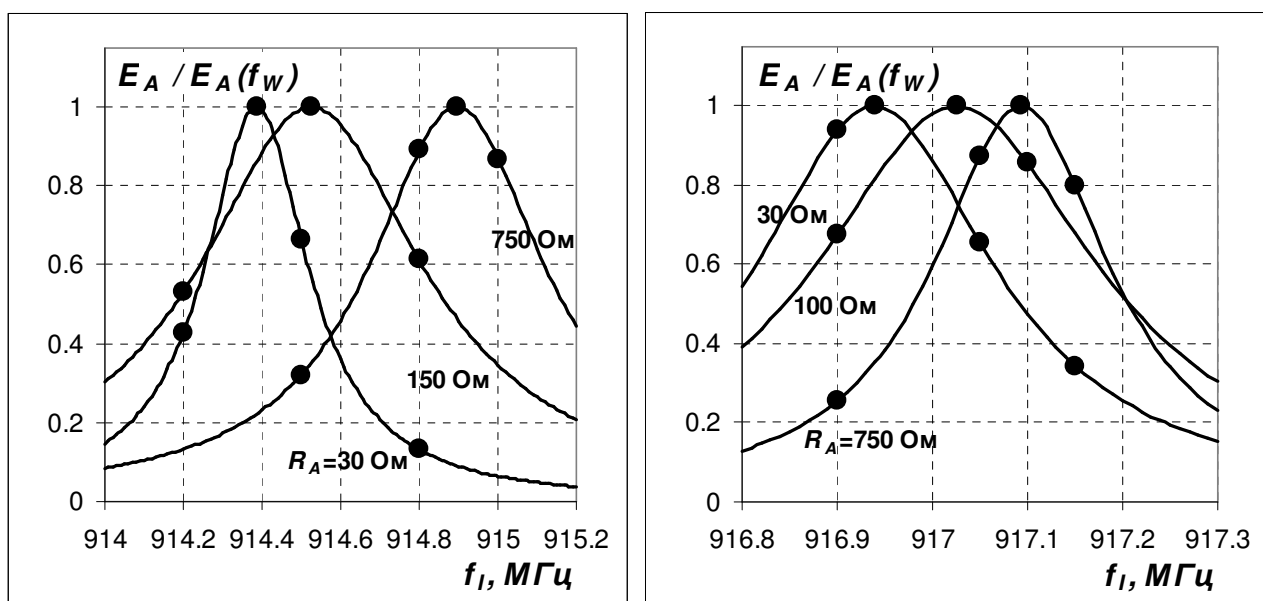


Рис. 16. Расчетная зависимость энергии переизлученного сигнала E_A , нормированной на $E_A(f_W)$, для резонатора на ПАВ (точки) и для эквивалентного колебательного контура (линии) от частоты опрашивающего сигнала f_l для двух разных резонаторов

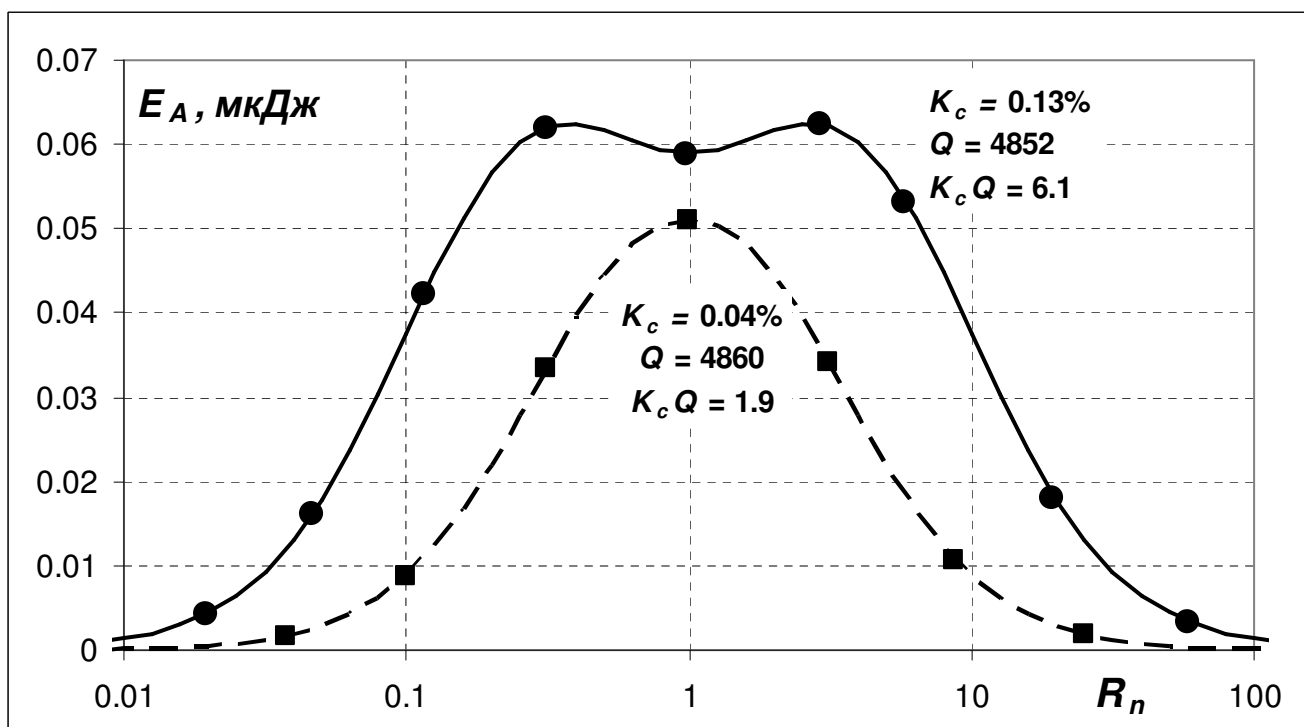


Рис. 17. Расчетная зависимость энергии переизлученного сигнала E_A для резонатора на ПАВ (точки) и для эквивалентного колебательного контура (линии) от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

Сравнение результатов расчета с использованием двух различных моделей показало, что рассмотренная модель с использованием колебательного контура вполне подходит для выявления основных тенденций влияния параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта на эффективность переизлучения энергии резонатором при импульсном опросе. Как правило, среди требований к характеристикам резонаторов, используемых в датчиках, присутствуют ограничения на величину побочных пиков в частотной характеристике проводимости и на их близость к основному резонансному пику. Таким образом, полученные результаты анализа модели применимы к резонаторам на ПАВ, которые могут быть использованы в беспроводных датчиках.

Два существенно отличающихся метода расчета также являются средствами для их взаимной проверки друг друга на предмет отсутствия ошибок в реализации алгоритмов расчета. Полученное совпадение результатов практически исключает наличие значительных ошибок в обоих расчетах, и является показателем достоверности полученных результатов.

2.6. Выводы по главе 2

В данной главе проведено теоретическое исследование влияния параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта на эффективность переизлучения энергии датчиком при его импульсном опросе. Величина энергии сигнала, излучаемого датчиком после окончания действия опрашивающего сигнала, рассчитана двумя различными методами. Один метод заключался в численном расчете частотной характеристики резонатора на ПАВ методом связанных мод, расчете с ее использованием спектра тока, протекающего через резонатор и входное сопротивление радиотехнического тракта, и его численном преобразовании в зависимость этого тока от времени. Другой метод заключался в замещении резонатора колебательным контуром (параметры которого таковы, что его частотные характеристики максимально близки к частотным характеристикам резонатора на ПАВ на частотах, близких к резонансной частоте) и приближенном аналитическом решении данной задачи. Анализ результатов аналитического решения позволил сделать исчерпывающие выводы об основных тенденциях влияния параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта на эффективность переизлучения энергии.

1. Энергия переизлученного датчиком сигнала (отклика) может быть представлена в виде максимально возможной накопленной в резонаторе энергии W_{lim} (достигаемой при согласовании входного радиотехнического тракта и импеданса резонатора в

установившемся режиме) и коэффициента η , названного показатель эффективности переизлучения энергии. Описана зависимость оптимальной частоты опрашивающего сигнала (при которой накопленная в резонаторе энергия максимальна) от параметров резонатора и радиотехнического тракта. Описана зависимость η при оптимальной частоте опрашивающего сигнала от параметров резонатора и радиотехнического тракта. Показано, что она может быть сведена к зависимости от двух параметров: произведения $K_c Q$ и нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n . Описана зависимость оптимального сопротивления радиотехнического тракта (при котором достигается максимальное значение η) от параметров резонатора. Показано, что зависимость оптимального значения R_n от параметров резонатора сводится к зависимости от $K_c Q$.

2. Установлено, что η не может превышать величину $\eta_{\max} \approx 0,6$; если $K_c Q \geq 4$, то при оптимальных значениях входного сопротивления радиотехнического тракта η достигает η_{\max} при любом из таких значений $K_c Q$; если $K_c Q < 4$, то значение η , достигаемое при оптимальных значениях R_n , меньше, чем η_{\max} , и монотонно возрастает с ростом $K_c Q$. При этом величина W_{lim} прямо пропорциональна добротности Q . Таким образом, для достижения максимальной энергии отклика следует использовать резонаторы с как можно большей добротностью и с произведением $K_c Q$, близким к 4 или более. Кроме того, для достижения определенного значения η в некотором диапазоне значений R_n следует выбирать резонатор со значением $K_c Q$, находящемся в определенном диапазоне (зависящем от требований к величине η и диапазону R_n). То есть, в отдельных случаях слишком высокое значение $K_c Q$ может быть также нежелательно. Описанный метод анализа эффективности переизлучения энергии датчиком и полученные выводы приведены в [A16].
3. Результаты расчета обоими методами продемонстрировали их практически полное совпадение, что говорит как о допустимости использования в данной задаче эквивалентного контура и приближений, сделанных при аналитическом решении, так и об отсутствии существенных ошибок при реализации обоих методов.

Параметры резонатора на ПАВ зависят от свойств подложки, от толщины, ширины и свойств материала электродов и от параметров конструкции (числа электродов в ВШП и ОР, апертуры и т.п.). Свойства подложки являются основным фактором, ограничивающим максимальные достижимые значения K_c и Q . Величина ТКЧ резонатора TCF также определяется главным образом свойствами подложки. Влияние параметров электродов и конструкции резонаторов значительно меньше, чем влияние выбора подложки. Таким образом,

определение подложек, позволяющих получить одновременно требуемые значения TCF , K_c и Q , является наиболее важной задачей для выработки рекомендаций по созданию резонаторов на ПАВ с наилучшими характеристиками для использования в качестве чувствительных элементов датчиков температуры. В следующей главе будет проведено теоретическое исследование наиболее интересных для практического использования пьезоэлектрических материалов с целью определения для каждого из них ориентаций подложек, позволяющих получать характеристики ПАВ, наиболее подходящие для использования этих подложек для изготовления резонаторов на ПАВ для использования в датчиках температуры.

3. ВЫБОР ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1. Связь параметров резонаторов на ПАВ с характеристиками ПАВ

Как показано в предыдущих главах, основными параметрами резонатора на ПАВ, используемого как чувствительный элемент датчика температуры, являются TCF , K_c и Q . Рассмотрим связь этих параметров с величинами, характеризующими ПАВ.

ТКЧ резонатора определяется в первую очередь характерным для используемой ПАВ ТКЗ TCD . Значение ТКЧ близко к значению ТКЗ, взятому с противоположным знаком в случае, когда рабочая частота резонатора близка к частоте параллельного резонанса (здесь и далее, если не оговорено иное, под ТКЗ будем подразумевать температурный коэффициент задержки ПАВ, распространяющейся вдоль свободной поверхности пьезоэлектрика). В случае, когда рабочая частота резонатора близка к частоте резонанса, значение ТКЧ ближе к взятому с противоположным знаком значению температурного коэффициента задержки ПАВ, распространяющейся вдоль металлизированной поверхности пьезоэлектрика. Хотя в случае больших значений КЭМС K^2 температурное поведение частоты резонанса заметно отличается от температурного поведения частоты антирезонанса (разница их температурных коэффициентов может превышать $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), основные тенденции изменения ТКЧ при изменении ориентации подложки одинаковы. Помимо этого различие между TCF и $-TCD$ связано со свойствами материала электродов, их толщиной и шириной, с температурной зависимостью коэффициента отражения ПАВ от ОР, а также зависит от апертуры электродов и особенностей конструкции резонатора. В большинстве случаев эти факторы приводят к изменению значения ТКЧ, не превышающему нескольких единиц $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. В случае электродов большой толщины или электродов из материалов с высокой плотностью их влияние на ТКЧ может быть существенным. Как правило, для практического применения ввиду большого технологического разброса параметров стараются избегать использования таких структур. Отдельные случаи, когда их использование дает значительное преимущество, будут рассмотрены обособлено. Таким образом, для сравнения разнообразных подложек имеет смысл использовать TCD для оценки величины ТКЧ.

Поскольку, как отмечалось в первой главе, достижение приемлемой точности измерения в большинстве случаев возможно только при использовании пары резонаторов, для достижения определенной чувствительности датчика интерес представляет разница значений ТКЧ, а не сами значения. Поэтому представляет интерес определение ориентации подложек как с

максимальными, так и с минимальными значениями ТКЗ, вне зависимости от их знака и абсолютной величины. Отдельный интерес представляет определение ориентаций срезов, позволяющих получить максимальную разницу ТКЗ у ПАВ, распространяющихся в различных направлениях на одном и том же срезе. Использование пары направлений на одном и том же срезе дает возможность использовать единую подложку для пары резонаторов, что позволяет удешевить устройство и уменьшить его размеры.

Абсолютная величина ТКЗ также имеет значение, но не для достижения определенной чувствительности датчика, а для достижения определенного диапазона измеряемой температуры. Чем выше абсолютные значения ТКЗ (и, следовательно, значения ТКЧ резонаторов), тем меньше максимальный диапазон измеряемых температур, определяемый допустимым диапазоном рабочей частоты системы. При разных знаках ТКЧ пары резонаторов, диапазон связан с суммой их абсолютных значений, при этом он жестко связан с чувствительностью датчика. При одном знаке ТКЧ пары резонаторов, диапазон связан с наибольшим из их абсолютных значений, в этом случае ограничение диапазона сильнее, чем оно могло бы быть при такой же чувствительности датчика в случае разных знаков ТКЧ. Отношение наибольшего из абсолютных значений ТКЧ к разности их значений (в случае, если они имеют одинаковый знак) показывает, во сколько раз максимальный диапазон измеряемых температур меньше максимально возможного при данной чувствительности датчика.

Коэффициент связи K_c существенно зависит от конструкции резонатора, однако его максимально достижимое значение ограничено эффективным коэффициентом электромеханической связи K_{eff}^2 , который характеризует ПАВ, распространяющуюся в подложке с периодической структурой из электродов на ее поверхности, и является аналогом K^2 (характеризующего ПАВ, распространяющуюся в подложке со свободной поверхностью или с поверхностью, покрытой однородными слоями). Согласно [40] K_{eff}^2 связан с ζ соотношением

$$K_{eff}^2 = \frac{2\zeta^2 p_{IDT}}{\eta_{ef}^2 \omega C_{IDT}},$$

где p_{IDT} – период ВШП ($p_{IDT} = 2p$), η_{ef} – коэффициент, определяемый

количеством электродов в одном периоде ВШП, способом их подключения к шинам ВШП и их шириной. ζ является одним из СОМ-параметров, расчет которых описан в главе 2.

Здесь будет рассматриваться обыкновенный ВШП (с двумя электродами в периоде, что подразумевает единственно возможный способ их подключения к шинам) с шириной электродов, равной ширине зазоров. Ширину электродов принято характеризовать коэффициентом металлизации M , который равен отношению металлизированной площади электродной структуры к ее общей площади. Для рассматриваемых ВШП $M = 50\%$, $\eta_{ef} \approx 0,847$ [40]. K_{eff}^2 зависит не только от свойств подложки, но также и от параметров материала

электродов и их нормированной толщины $h_n = \frac{h_{IDT}}{p_{IDT}}$, где h_{IDT} – абсолютная толщина электродов. Приближенно влияние электродов на характеристики ПАВ можно оценить по влиянию сплошного слоя при частоте колебаний, на которой длина волны $\lambda = p_{IDT}$. Слой из того же материала, что и электроды, с толщиной $h = h_{IDT}M$ будем называть эквивалентным слоем.

В таблице 1 сравниваются значения K^2 для свободной поверхности и для поверхности с эквивалентным слоем металла, значения K_{eff}^2 и расчетные значения K_c для резонаторов, спроектированных для датчика температуры [A18]. Для вычисления K^2 использовались модифицированная программа VCAL [39], где он рассчитывается по зависимости эффективной диэлектрической проницаемости (которая определяется соотношением заряда и напряжения на поверхности подложки) от предполагаемой скорости ПАВ.

Как показывают приведенные примеры, в большинстве случаев K^2 для свободной поверхности и для эквивалентного слоя незначительно отличаются друг от друга и от K_{eff}^2 . В редких случаях значение K^2 для эквивалентного слоя превышает значение для свободной поверхности до двух раз, а K_{eff}^2 до двух раз превышает K^2 для эквивалентного слоя, что наблюдается в случае преобладания в характерных для ПАВ механических смещениях горизонтально-поперечной компоненты. Большая разница между K_{eff}^2 и K^2 для свободной поверхности характерна для волн ВГБ. Среди приведенных в таблице примеров резонаторов, волна данного типа распространяется на подложке с ориентацией (0, 160°, 90°). В этом случае K^2 для эквивалентного слоя превышает значение для свободной поверхности в 15 раз, а K_{eff}^2 превышает K^2 для свободной поверхности более, чем в 20 раз. Вместе с тем, K_{eff}^2 превышает K^2 для эквивалентного слоя в полтора раза, т.е. одна величина дает представление о порядке другой. K_c в приведенных примерах в полтора – два раза меньше, чем K_{eff}^2 . Сопоставление приведенных в таблице величин показывает, что в случае ПАВ, имеющих все компоненты смещения (или не имеющие горизонтально-поперечной компоненты), ожидаемые значения K_c резонаторов можно приближенно оценивать значением K^2 для свободной поверхности. В большинстве случаев K_c составляет не меньше $0,5K^2$ и не превышает $2K^2$.

Учитывая, что K^2 на используемых подложках, и, соответственно K_c , изменяются от сотых долей процента до единиц процента, данная весьма грубая оценка позволяет сравнивать разные материалы и определять области ориентаций подложки, использование которых может позволить получить резонаторы с более высокими значениями K_c . В случае ВГБ для оценки K_c необходимо учитывать наличие электродов, при этом для грубой оценки можно использовать K^2 для эквивалентного слоя. Надо заметить, что получение более низких значений K_c (как

отмечалось в главе 2, ограничение как минимального, так и максимального значения K_c может требоваться при необходимости получения высокой эффективности переизлучения энергии при изменении R_A в широком диапазоне), как правило, легко решается выбором соответствующей конструкции. То есть, в таких случаях нет необходимости специально выбирать подложку с более низким КЭМС.

Таблица 1. Сравнение значений K^2 для свободной поверхности, K^2 для поверхности с эквивалентным слоем металла, K_{eff}^2 и K_c различных резонаторов.

Ориентация подложки из кварца (углы Эйлера)	Относительная толщина алюминиевых электродов h_n , %	K^2 для свободной поверхности, %	K^2 для поверхности с эквивалентным слоем из Al, %	K_{eff}^2 , %	K_c , %
(0, 90°, 0)	3	0,18	0,17	0,18	0,11
(0, 90°, 45°)	2,8	0,05	0,051	0,047	0,036
(0, 50°, 0)	1,9	0,12	0,13	0,13	0,072
(0, 50°, 60°)	1,75	0,047	0,044	0,046	0,027
(0, 60°, 0)	2,85	0,19	0,18	0,21	0,08
(0, 60°, 60°)	2,6	0,03	0,029	0,029	0,02
(0, 160°, 37°)	2,75	0,09	0,1	0,17	0,054
(0, 160°, 80°)	2,55	0,032	0,037	0,056	0,039
(0, 160°, 90°)	2,25	0,008	0,12	0,18	0,13
(30°, 90°, 63°)	2,45	0,031	0,037	0,038	0,029
(30°, 90°, 170°)	2,85	0,22	0,2	0,21	0,13
(30°, 104°, 75°)	2,5	0,031	0,035	0,038	0,015
(30°, 104°, 168°)	2,85	0,22	0,21	0,21	0,15
(30°, 122°, 90°)	2,6	0,031	0,035	0,036	0,024
(30°, 122°, 165°)	2,8	0,24	0,23	0,24	0,09
(30°, 168°, 62°)	2,75	0,034	0,067	0,14	0,072
(30°, 168°, 120°)	2,5	0,036	0,044	0,073	0,046

Для достижения определенной добротности требуется определенное значение коэффициента отражения ОР. Его достаточный уровень в большинстве случаев может быть достигнут соответствующим выбором материала металлизации резонатора (или с использованием ОР из вытравленных в пьезоэлектрике канавок), выбором коэффициента

металлизации и использованием ОР из достаточно большого число элементов. Угол отклонения потока энергии PFA и параметр дифракции $\gamma = \frac{\partial PFA}{\partial \psi}$, вероятно, влияют на максимальные достижимые значения добротности, но, как показывает практика, приемлемые значения добротности резонатора могут быть получены при различных значениях этих параметров. Предельные значения Q ограничены вязкостью материала подложки, однако, с одной стороны, практически получаемые значения существенно меньше теоретических предельных значений, с другой стороны, для расчета предельного значения Q для всевозможных подложек необходимы данные по вязкости их материалов с учетом анизотропии. Полные наборы таких данных для рассматриваемых кристаллов среди опубликованных данных по физическим свойствам материалов не обнаружены, а их определение выходит за рамки данной работы.

Хотя достижение приемлемых значений Q возможно на различных подложках, наибольшие достижимые значения некоторым образом зависят от подложки. Поэтому при описании подложек, позволяющих достигать экстремальные значения ТКЗ и максимальные значения КЭМС, будем рассматривать альтернативные варианты подложек, не ограничиваясь только теми из них, которые демонстрируют наилучшие значения указанных параметров. Надо заметить, что помимо ПАВ в узком смысле слова (т.е. волн, у которых отсутствует вытекание энергии в глубину подложки) в устройствах на ПАВ нередко используются и вытекающие поверхностные волны (называемые иногда псевдоповерхностными волнами или приповерхностными волнами). Наличие вытекания энергии в глубину подложки существенно ограничивает добротность, поэтому рассмотрены только невытекающие волны.

Учитывая вышеизложенное, расчет параметров волн, распространяющихся на различных подложках из различных материалов, будет проведен для получения следующих результатов. Во-первых, определение областей ориентаций пар подложек, на которых при определенном значении разницы ТКЗ достигается максимальный КЭМС и определение его значений. Во-вторых, определение областей ориентаций срезов, на которых при определенном значении разницы ТКЗ ПАВ, распространяющихся в различных направлениях, достигается максимальный КЭМС; определение его значений и соответствующих направлений распространения. Зависимость максимального КЭМС от разницы ТКЗ отображает зависимость максимальной разности ТКЗ от требуемого КЭМС (такого значения КЭМС, которое должно быть достигнуто или превышено на обеих подложках или в обоих направлениях распространения ПАВ) и наоборот.

3.2. Исследуемые подложки и типы волн

Расчет параметров ПАВ проведен для четырех наиболее используемых пьезоэлектрических кристаллов: кварца, лангасита, танталата лития и ниобата лития. В качестве исходных данных для расчета использовались модули упругости, пьезоэлектрические модули, компоненты тензора диэлектрической проницаемости, температурные коэффициенты этих величин, а также плотность и температурный коэффициент линейного расширения. Использовались приведенные в [90] данные кварца, приведенные в [82] данные лангасита и приведенные в [49, 91] данные танталата лития и ниобата лития. Для расчета использовалась модифицированная программа VCAL [39].

Как указывалось в предыдущем разделе, в рамках данной работы будут рассматриваться только невытекающие волны (ПАВ в узком смысле слова). ПАВ является невытекающей, независимо от наличия на поверхности подложки дополнительных слоев и их параметров, а также независимо от температуры, при выполнении хотя бы одного из двух следующих условий. Во-первых, невытекающими являются ПАВ, имеющие наименьшую фазовую скорость среди всех ПАВ, распространяющихся на данной подложке. Во-вторых, на подложках, в которых горизонтально-поперечные механические смещения не связаны механически или через пьезоэлектрический эффект с вертикально-поперечными и продольными механическими смещениями (это соблюдается для отдельных ориентаций подложки, связанных с элементами симметрии кристаллов), невытекающими могут быть и ПАВ, имеющие большую скорость.

Кристаллы кварца и лангасита принадлежат к классу 32 тригональной системы. Для описания всевозможных ориентаций среза и направлений распространения ПАВ достаточно сделать расчет для углов Эйлера, изменяющихся в пределах $0 \leq \varphi \leq 30^\circ$, $0 \leq \theta \leq 180^\circ$, $0 \leq \psi \leq 180^\circ$. Расчет параметров ПАВ, имеющей наименьшую фазовую скорость, проведен для указанных диапазонов углов Эйлера с шагом 10° для φ и θ и с шагом 5° для ψ . В случаях, когда сагиттальная плоскость перпендикулярна кристаллографической оси X (то есть, направление распространения ПАВ и нормаль к поверхности среза перпендикулярны оси X) в кристаллах данного класса горизонтально-поперечные смещения не связаны с вертикально-поперечными и продольными смещениями. Данным ориентациям подложки соответствуют значения углов Эйлера $\varphi = 0$ и $\psi = 90^\circ$ при произвольном значении угла θ . На таких подложках наблюдается распространение волны Гуляева – Блюштейна [2, 13], а также волны Рэлея (механические смещения которой не имеют горизонтально-поперечной компоненты), имеющей нулевой КЭМС. ВГБ распространяется без вытекания энергии в глубину подложки, в том числе и тогда, когда ее скорость превышает скорость вертикально-поперечной ОАВ. Расчет параметров ВГБ

проведен с шагом θ 1° . В зависимости от значения θ меньшая скорость может быть как у ВГБ, так и волны Рэлея (диапазоны значений θ , соответствующие одному или другому случаю, зависят от материала). В первом случае ВГБ уже описана расчетом ПАВ с наименьшей скоростью, а волна Рэлея не представляет интереса, поскольку при строгом соответствии условиям $\varphi = 0$ и $\psi = 90^\circ$ имеет нулевой КЭМС, а при некотором отклонении является вытекающей. Во втором случае расчетом ПАВ с наименьшей скоростью уже описана волна Рэлея, а не описанная им ВГБ представляет отдельный интерес. При $\varphi \neq 0$ или $\psi \neq 90^\circ$ механические смещения в ПАВ имеют все три компонента и в отдельных случаях, могут быть как подобны волне Рэлея (такую ПАВ можно называть квази-рэлеевской волной), так и иметь преобладающее горизонтально-поперечное смещение (такую ПАВ можно называть квази-горизонтально-поперечной волной). КЭМС ВГБ существенно зависит от наличия на поверхности подложки электродов и их параметров. Таким образом, даже при очень малом K^2 для свободной поверхности (а также, в частных случаях, когда вдоль свободной поверхности ВГБ не распространяется, хотя ориентация подложки позволяет это) K_{eff}^2 может иметь приемлемую величину при использовании электродов достаточно большой толщины или их изготовлении из достаточно тяжелого материала. При расчете параметров ВГБ учитывалось, что на поверхности подложки находится слой металла (эквивалентный слой, позволяющий оценить влияние соответствующей структуры из электродов).

Кристаллы танталата лития и ниобата лития принадлежит к классу $3m$ тригональной системы. Для описания всевозможных ориентаций среза и направлений распространения ПАВ достаточно сделать расчет для углов Эйлера, также изменяющихся в пределах $0 \leq \varphi \leq 30^\circ$, $0 \leq \theta \leq 180^\circ$, $0 \leq \psi \leq 180^\circ$. Расчет параметров ПАВ, имеющей наименьшую фазовую скорость, проведен для указанных диапазонов углов Эйлера с шагом 10° для φ и θ и с шагом 5° для ψ . В случаях, когда сагитальная плоскость перпендикулярна кристаллографической оси X , (при $\varphi = 0$, $\psi = 90^\circ$ и произвольном θ) в кристаллах данного класса горизонтально-поперечные смещения тоже не связаны с вертикально-поперечными и продольными смещениями. В данном случае на таких подложках распространяется горизонтально-поперечная ОАВ, смещения которой не связаны с электрическим полем, вертикально-поперечными и продольными смещениями, и ПАВ, смещения которой не имеют горизонтально-поперечной компоненты и в общем случае связаны с электрическим полем; будем называть эту ПАВ пьезоактивной волной Рэлея (ПВР). Расчет параметров ПВР проведен с шагом θ 1° . В зависимости от значения θ меньшая скорость может быть как у ПВР, так и горизонтально-поперечной ОАВ (диапазоны значений θ , соответствующие одному или другому случаю, зависят от материала). В первом случае ПВР уже описана расчетом ПАВ с наименьшей скоростью, а горизонтально-поперечная ОАВ не представляет интереса, поскольку при строгом соответствии условиям $\varphi = 0$ и $\psi = 90^\circ$ имеет

нулевой КЭМС, а при некотором отклонении переходит в вытекающую ПАВ. Во втором случае расчетом ПАВ с наименьшей скоростью уже описана горизонтально-поперечная ОАВ (в нее при $\varphi = 0$ и $\psi = 90^\circ$ переходит ПАВ), а не описанная им ПВР представляет отдельный интерес. При $\varphi \neq 0$ или $\psi \neq 90^\circ$ механические смещения в ПАВ имеют все три компоненты и в отдельных случаях могут быть как подобны волне Рэлея, так и иметь преобладающее горизонтально-поперечное смещение.

3.3. Параметры ПАВ на подложках из кварца

3.3.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из кварца

Подложки из кварца являются одними из наиболее широко используемых для изготовления устройств на ПАВ. Известно множество примеров использования резонаторов на ПАВ, выполненных на подложках из кварца, в качестве датчиков температуры [16, 38, 43, 80]. Также существует ряд публикаций, в которых исследуются свойства подложек из кварца применительно к их использованию для датчиков температуры [20, 60]. В этих работах рассматриваются только отдельные ориентации подложки или группы ориентаций и не рассматривается вопрос о том, какие из них являются наилучшими среди всех возможных. Результаты расчета ТКЗ ПАВ для всевозможных ориентаций подложки приведены в [90], но в этой публикации не проводится анализ данных результатов на предмет выбора ориентации подложки, наиболее подходящей для датчика температуры. В данной диссертации впервые проведен анализ результатов расчета параметров ПАВ для всевозможных ориентаций подложки из кварца применительно к их использованию в качестве подложки для устройства на ПАВ, служащего чувствительным элементом датчика температуры.

На рисунке 18 приведены линии уровня зависимости ТКЗ от углов θ и ψ при двух фиксированных значениях угла φ : 0 и 30° . Аналогичные графики для $\varphi = 10^\circ$ и $\varphi = 20^\circ$, а также линии уровня зависимостей скорости ПАВ V , K^2 и PFA от θ и ψ при четырех фиксированных значениях φ (0, 10° , 20° и 30°) приведены в приложении (рис. 52 – 55).

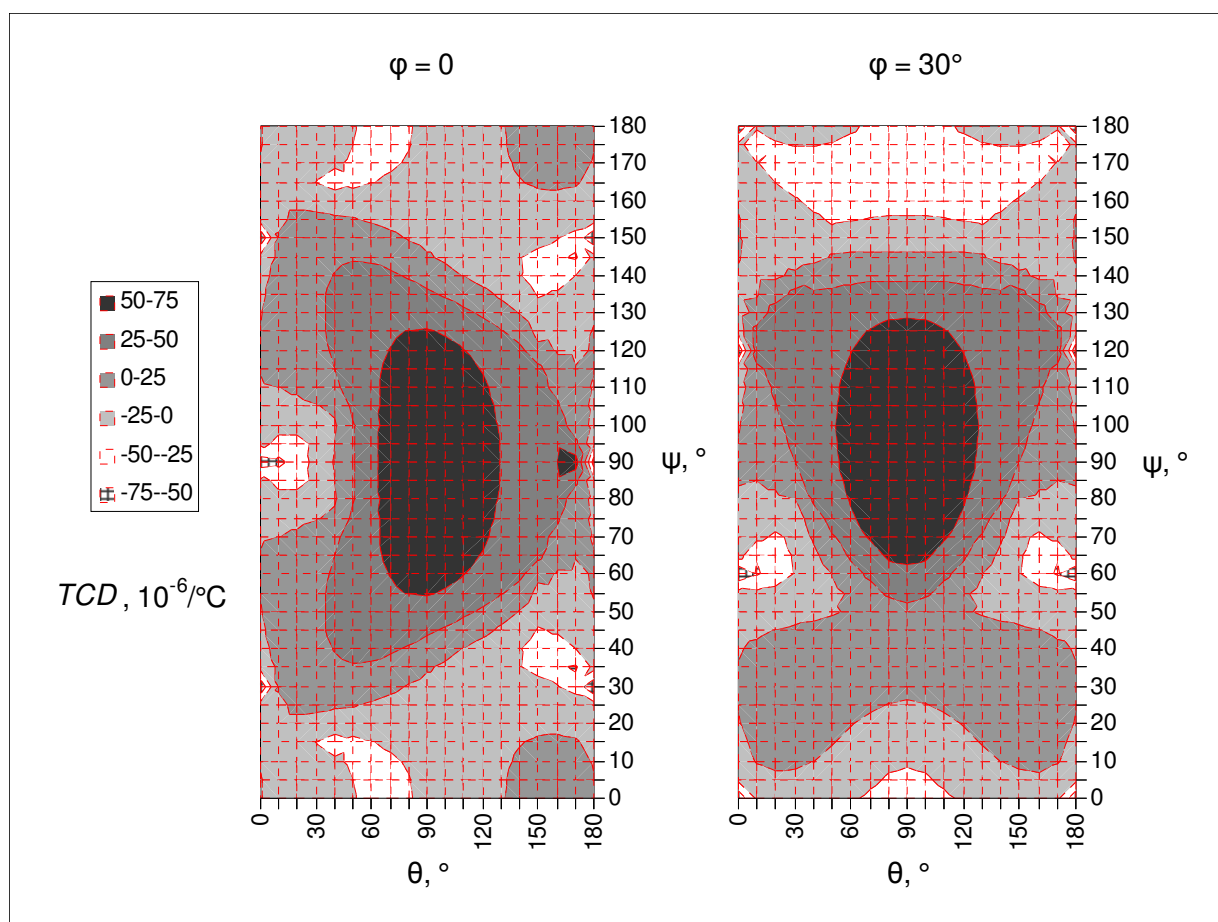


Рис. 18. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (слева) и $\varphi = 30^\circ$ (справа)

На рисунке 19 приведен график зависимости ТКЗ ВГБ от угла θ при наличии на поверхности подложки слоя алюминия толщиной 0,5% от длины волны λ . Графики зависимости V и K^2 от θ приведены в приложении (рисунки 56, 57), $PFA = 0$ для ВГБ на всех подложках, где они существуют. Для расчета использовались усредненные модули упругости алюминия, полученные на основе данных по его механическим и акустическим свойствам, приведенных в [3], (модуль упругости $C_{11} = 120$ ГПа, модуль упругости $C_{44} = 25$ ГПа); использовалось значение плотности, приведенное в [3]; и использовались значения температурных коэффициентов модулей упругости и плотности, приведенные в [5].

В случае кварца скорость ВГБ превышает скорость волны Рэлея на подложках, ориентации которых соответствуют значениям угла θ , находящимся в диапазоне от 76° до 176° . На рисунке границы данной области отмечены вертикальными пунктирными линиями. Горизонтальные пунктирные линии показывают границы диапазона, в котором находятся значения TCD ПАВ с наименьшей скоростью. Как видно на рисунке, в случае кварца оказалось,

что именно ВГБ со скоростями, превышающими скорость волны Рэлея, имеют наибольшие и наименьшие значения TCD .

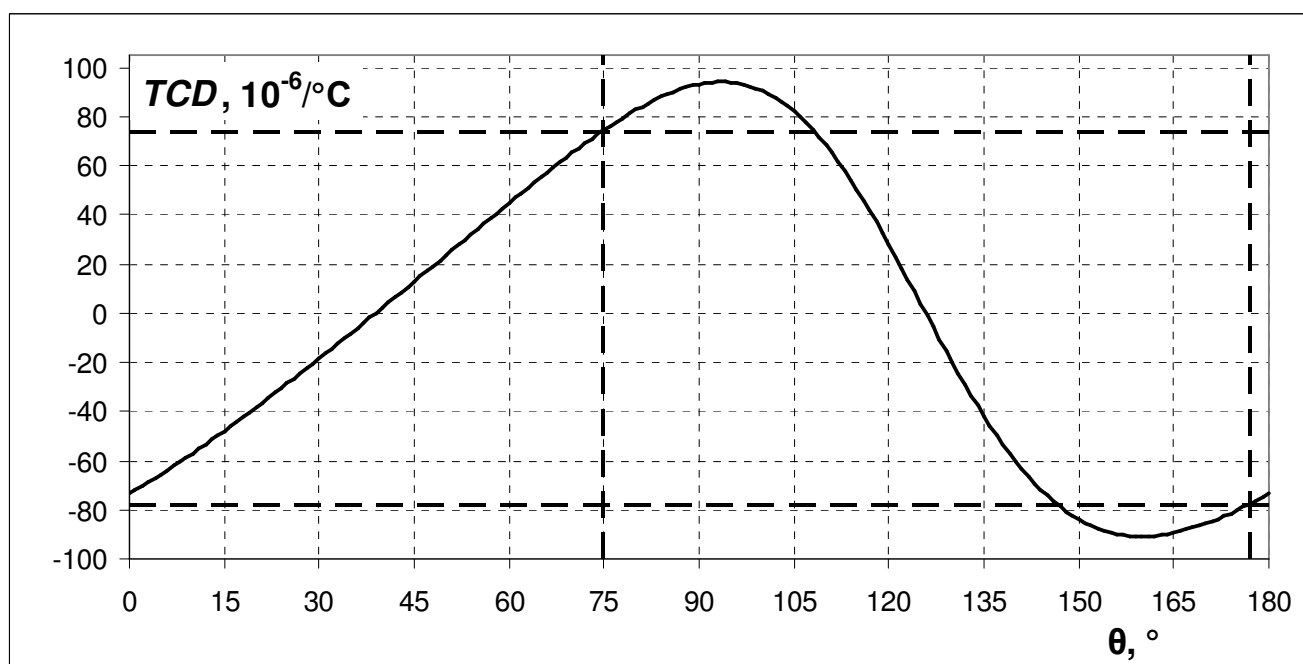


Рис. 19. Зависимость ТКЗ TCD ВГБ на подложках из кварца от второго угла Эйлера θ

3.3.2. Подложки из кварца с максимальным и минимальным ТКЗ

Максимальный ТКЗ согласно расчету имеет величину $91 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ВГБ на $3^{\circ}Y$ -срезе (соответствующие углы Эйлера $(0, 93^{\circ}, 90^{\circ})$). При наличии на поверхности слоя алюминия толщиной $0,5\%$ от λ $K^2 = 0,001\%$. Близкими свойствами обладает ВГБ на Y -срезе (соответствующие углы Эйлера $(0, 90^{\circ}, 90^{\circ})$): расчетный TCD ниже на $1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, а расчетный K^2 при малой толщине алюминия примерно вдвое выше. На рисунке 20 приведены графики зависимости расчетного K^2 ВГБ от толщины пленки алюминия для данных подложек.

Достижение приемлемых значений КЭМС требует использования электродов из весьма толстого алюминия (по сравнению с обычно используемой при производстве устройств на ПАВ толщиной) или использования электродов из материалов с высокой плотностью. Возможности увеличения K^2 ограничены увеличением технологического разброса параметров устройств и снижением достижимых уровней Q , присущих использованию таких электродов. Указать максимальные значения K^2 без конкретизации требований к устройству затруднительно. K^2 около $0,1\%$ (наиболее типичное значение для кварцевых подложек, используемых для

резонаторов на ПАВ) не достигается даже при толщине эквивалентного слоя 10% от λ , что соответствует h_n около 20% (по крайней мере, h_n не менее 10%), при том, что типичные значения толщины алюминиевых электродов не превышают нескольких процентов. Учитывая это, можно уверенно говорить о том, что представляют интерес альтернативные варианты подложек с высокими значениями ТКЗ. Надо заметить, что алюминиевое покрытие немного увеличивает ТКЗ, что в данном случае является улучшением данного параметра.

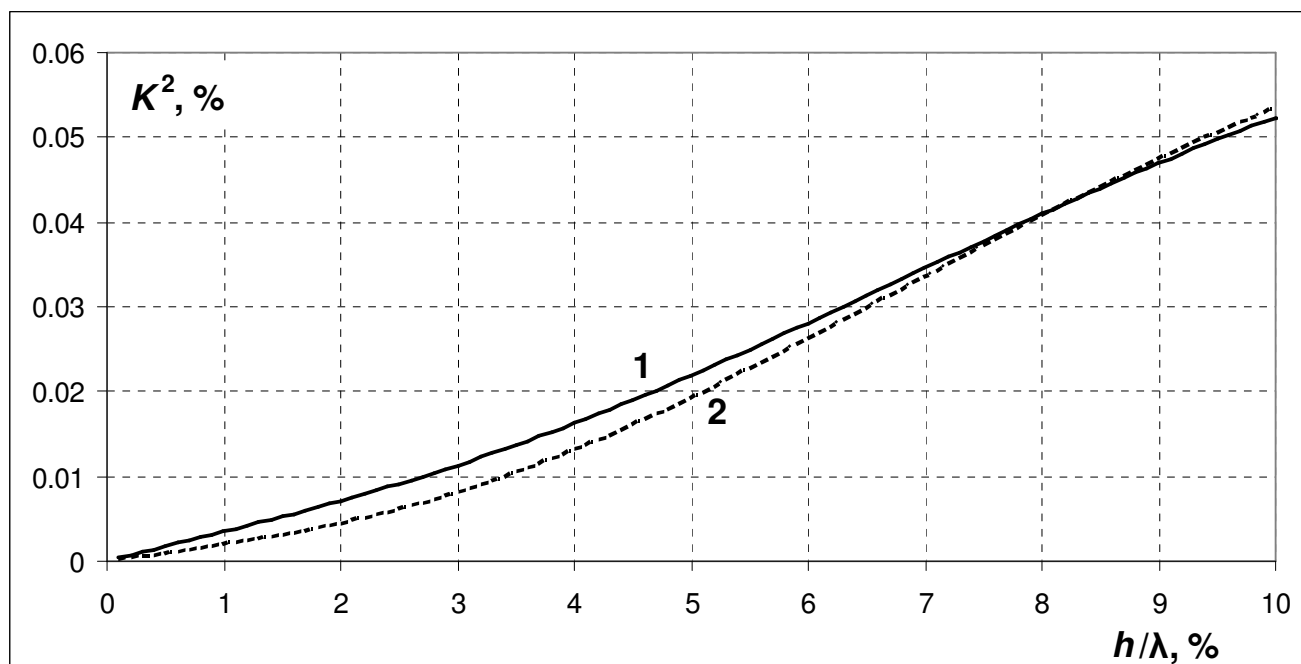


Рис. 20. Зависимость КЭМС K^2 ВГБ на Y -срезе кварца (1) и $3^\circ Y$ -срезе кварца (2) от толщины слоя алюминия h , отнесенной к длине волны λ

Минимальный ТКЗ согласно расчету имеет величину $-90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и достигается при распространении ВГБ на $70^\circ Y$ -срезе (соответствующие углы Эйлера $(0, 160^\circ, 90^\circ)$). При наличии на поверхности слоя алюминия толщиной 0,5% от длины волны $K^2 = 0,08\%$. На рисунке 21 приведены графики зависимости расчетного K^2 и TCD ВГБ от толщины пленки алюминия для данного среза. Штрих-пунктирными линиями для сравнения показаны уровни максимального K^2 и минимального TCD ПАВ с наименьшей скоростью.

Абсолютная величина TCD снижается с ростом толщины пленки, и соответственно, с ростом K^2 . Но даже при достижении $K^2 \approx 0,25\%$ (максимального значения для ПАВ с наименьшей скоростью, распространяющихся вдоль свободной поверхности) значение TCD ВГБ остается ниже, чем его минимальное значение для других невытекающих ПАВ. В данном случае достижение приемлемых значений КЭМС возможно при использовании электродов с типичными для производства устройств на ПАВ параметрами. Тем не менее альтернативные варианты подложек с низкими значениями ТКЗ тоже могут представлять интерес.

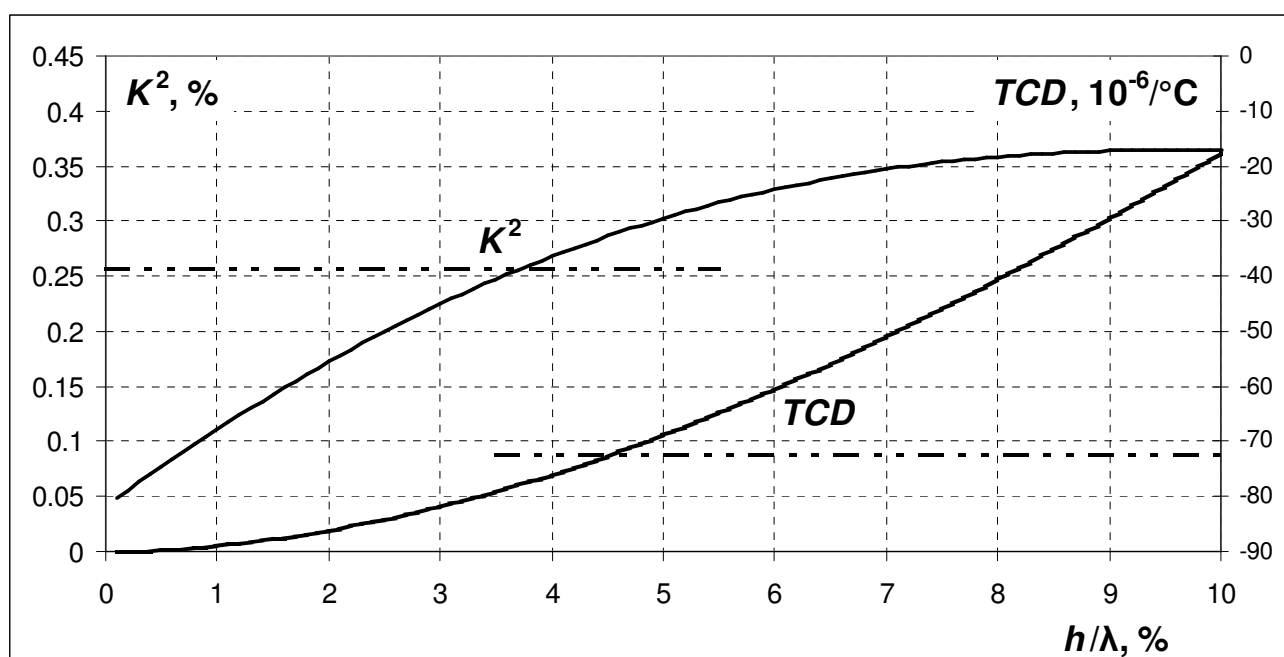


Рис. 21. Зависимость КЭМС K^2 и ТКЗ TCD ВГБ на $70^\circ Y$ -среze кварца от толщины слоя алюминия h , отнесенной к длине волны λ

Использование более толстых электродов (или электродов из материалов с высокой плотностью) позволяет получить большие значения K^2 ; например, сплошная пленка из алюминия на $70^\circ Y$ -среze позволяет достичь $K^2 \approx 0,35\%$. С ростом h изменение K^2 при изменении h становится меньше, а и изменение TCD при изменении h становится сильнее. Таким образом, использование резонаторов с несколько отличающейся толщиной или шириной электродов (последнее выглядит предпочтительнее ввиду более простой технологии изготовления) на данной подложке или близких к ней потенциально позволяет получить пару резонаторов с $K^2 > 0,25\%$ и разностью ТКЧ Δ_{TCF} до $60 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Однако возможности практического использования данного варианта ограничены вышеупомянутым увеличением технологического разброса параметров устройств и снижением достижимых уровней Q , присущим использованию электродов большой толщины или электродов из материалов с высокой плотностью.

Также следует отметить, что поскольку скорость ВГБ на упомянутых здесь подложках превышает скорость одной из ОАВ, они являются невытекающими только при распространении строго перпендикулярном к оси X ; при некотором отклонении ψ от 90° , ВГБ переходит в вытекающую ПАВ. Вытекание энергии в глубину подложки, связанное с этим обстоятельством, также может присутствовать за счет конечной апертуры ВШП и ОР. Это является дополнительным фактором, обуславливающим интерес к альтернативным вариантам подложек.

3.3.3. Области ориентации подложек из кварца с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС

Среди ПАВ с наименьшей скоростью согласно расчету максимальный $TCD = 74 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ВГБ на $-15^{\circ}Y$ -срезах (в данном случае ее скорость ниже скорости волны Рэлея). Данной ориентации подложки соответствуют углы Эйлера $(0, 75^{\circ}, 90^{\circ})$. Наличие максимума именно в этой точке обусловлено тем, что в ней скорость ВГБ достигает скорости волны Рэлея, и при больших значениях θ ТКЗ ПАВ с наименьшей скоростью имеет меньшее значение, хотя ТКЗ ВГБ при увеличении θ продолжает возрастать. При наличии на поверхности подложки слоя алюминия с $h = 0,5\%$ от λ $K^2 = 0,005\%$.

Локальный максимум $TCD = 70 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ достигается при распространении ПАВ на X -срезах в направлении, отклоненном примерно на 75° от оси Y в сторону оси Z (углы Эйлера $(30^{\circ}, 90^{\circ}, 105^{\circ})$ или $(90^{\circ}, 90^{\circ}, 75^{\circ})$). Данной ориентации подложки соответствует $K^2 = 0,005\%$, $PFA = 12^{\circ}$ и $\gamma = -0,1$. Вокруг данной ориентации существует область ориентаций подложки со сравнительно высокими значениями ТКЗ (например, $TCD > 50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ может достигаться при различных значениях φ , $50^{\circ} < \theta < 130^{\circ}$, $55^{\circ} < \psi < 130^{\circ}$). В данной области можно выбрать ориентацию, позволяющую получить компромиссное сочетание параметров с TCD несколько меньшим максимального, но с более высоким K^2 , меньшим PFA , более близким к оптимальному значению γ .

Локальный максимум $TCD = 60 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ существует вблизи ориентации подложки, определяемой углами Эйлера $(0, 170^{\circ}, 90^{\circ})$. В данном случае речь идет о волне Рэлея, в то время как ВГБ, распространяющаяся в том же направлении с большей скоростью, напротив имеет ТКЗ, близкий к минимальному. Данной ориентации подложки соответствует $K^2 = 0$. Вокруг данной ориентации существует более узкая область ориентаций подложки со сравнительно высокими значениями ТКЗ (например, $TCD > 50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ может достигаться при значениях $\varphi < 25^{\circ}$, $160^{\circ} < \theta < 175^{\circ}$, $\varphi + 85^{\circ} < \psi < \varphi + 95^{\circ}$), в которой также может быть выбрана ориентация с компромиссными свойствами.

Среди ПАВ с наименьшей скоростью согласно расчета минимальный $TCD = -76 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ВГБ на $87^{\circ}Y$ -срезах (в данном случае ее скорость ниже скорости волны Рэлея). Данной ориентации подложки соответствуют углы Эйлера $(0, 177^{\circ}, 90^{\circ})$. Наличие минимума именно в этой точке обусловлено тем, что в ней скорость ВГБ достигает скорости волны Рэлея, и при меньших значениях θ ТКЗ ПАВ с наименьшей скоростью имеет большее значение, хотя ТКЗ ВГБ при уменьшении θ продолжает убывать. При наличии на поверхности подложки слоя алюминия с $h = 0,5\%$ от λ $K^2 = 0,044\%$. Близкими

свойствами обладает ВГБ, распространяющаяся на Z -срезе, (немного больший $TCD = -72 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и немного меньший $K^2 = 0,04\%$ при толщине слоя алюминия $0,5\%$ от λ). Поскольку ось Z является осью симметрии третьего порядка, на Z -срезе одинаковыми свойствами обладают волны, распространяющиеся в трех направлениях, отклоненных друг от друга на 120° (в шести направлениях, отклоненных друг от друга на 60° , с учетом одинаковых свойств, при распространении в противоположные стороны). ВГБ распространяется на Z -срезе в направлениях, определяемых углами Эйлера $(0, 0, \pm 30^{\circ})$, $(0, 0, \pm 90^{\circ})$, $(0, 0, \pm 120^{\circ})$ или $(0, 180^{\circ}, \pm 30^{\circ})$, $(0, 180^{\circ}, \pm 90^{\circ})$, $(0, 180^{\circ}, \pm 120^{\circ})$. Вокруг данных ориентаций подложки существуют небольшие области ориентаций со сравнительно низкими значениями ТКЗ, в которых можно выбирать ориентацию, позволяющую получить компромиссное сочетание параметров.

Локальный минимум $TCD = -44 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ существует вблизи ориентации подложки, определяемой углами Эйлера $(30^{\circ}, 40^{\circ}, 165^{\circ})$. Данной ориентации подложки соответствует $K^2 = 0,19\%$, $PFA = 10^{\circ}$. Эта ориентация подложки находится в области ориентаций (определяемой диапазонами углов Эйлера $\varphi > 15^{\circ}$, $35^{\circ} < \theta < 95^{\circ}$, $160^{\circ} < \psi < 180^{\circ}$), в которой возможно сочетание $TCD < -35 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и $K^2 > 0,2\%$ (в данной области находятся наиболее высокие для кварца значения K^2 при распространении ПАВ вдоль свободной поверхности).

3.3.4. Срезы кварца для использования единой подложки для пары резонаторов

Максимальное значение Δ_{TCF} согласно расчету составляет $145 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается на $78^{\circ}Y$ -срезе при использовании ВГБ с $TCD = -86 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, и распространяющейся в том же самом направлении волны Рэлея с $TCD = 59 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Данной ориентации подложки соответствуют углы Эйлера $(0, 168^{\circ}, 90^{\circ})$. Однако в данном случае волна Рэлея не может быть возбуждена непосредственно обычным ВШП, и, следовательно, не может быть использована в обычном устройстве на ПАВ. Таким образом, данный вариант интересен только в качестве ориентира максимального достижимого значения. Кроме того, он может быть применен для изготовления более сложных устройств, в которых возбуждение волны осуществляется либо за счет преобразования в нее другой волны (например, путем отражения ПАВ, распространяющейся в другом направлении), либо с помощью размещенного на поверхности кварца другого пьезоэлектрического материала.

Для получения приемлемого значения КЭМС у ПАВ с положительным ТКЗ необходимо использовать ПАВ, фазовая скорость которой направлена под некоторым углом к направлению распространения ВГБ. Выбор зависит от требований к КЭМС и к другим параметрам ПАВ, а

также от диапазона измеряемых температур. При этом оптимальное значение θ зависит от указанных требований. Например, в случае поиска ПАВ с $K^2 \geq 0,03\%$ при центральной температуре 38°C , по расчету оптимальным оказался 70°Y -срез (на котором в тоже время достигается максимум абсолютного значения отрицательного ТКЗ) [A18]. Требуемое значение K^2 достигается при распространении квази-рэлеевской волны под углом 10° к направлению распространения ВГБ (квази-рэлеевской волне соответствует $\psi = 80^\circ$ или $\psi = 100^\circ$). При этом направление групповой скорости квази-рэлеевской волны (направление распространения переносимой волной энергии) по расчету практически совпадает с направлением распространения ВГБ, что позволяет расположить устройства строго параллельно друг другу и минимизировать площадь подложки, занимаемую парой резонаторов.

Локальный максимум $\Delta_{TCF} = 112 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ существует вблизи Y -среза. В данном случае наибольший $TCD = 90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ имеет ВГБ (распространяющаяся вдоль оси Z), а наименьший $TCD = -22 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ имеет ПАВ, распространяющаяся вдоль оси X . Недостатком этого варианта является необходимость использовать особо толстые электроды (в случае, если их материалом является алюминий) или изготавливать электроды из более тяжелого металла. Преимущество данного варианта состоит в том, что Y -срез является широко используемым срезом, подложки из него производятся массово и, следовательно, более дешевы и могут быть приобретены в максимально короткий срок без дополнительных процедур согласования спецификаций заказчиком и изготовителем.

При использовании ПАВ только с наименьшей скоростью наибольшие значения Δ_{TCF} достигаются при использовании срезов, которым соответствуют значения θ от 150° до 175° и различными значениями φ . Максимальный TCD достигается при распространении ПАВ в направлениях, для которых значение ψ находится вблизи $(90^\circ + \varphi)$. Минимальный TCD достигается при распространении ПАВ в направлениях, для которых значение третьего угла Эйлера ψ находится вблизи $(30^\circ + \varphi)$. При отсутствии требований к K^2 и другим характеристикам ПАВ Δ_{TCF} в данной области достигает $116 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Локальный максимум Δ_{TCF} также достигается на X -срезе (при отсутствии требований к K^2 и другим характеристикам разница Δ_{TCF} на нем достигает $106 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). При поиске ПАВ с $K^2 > 0,01\%$ локальный максимум Δ_{TCF} достигается при использовании срезов, которым соответствуют значения θ от 40° до 90° и значения $\varphi > 15^\circ$. Чем выше требуемый уровень K^2 , тем сильнее соответствующее максимальной Δ_{TCF} значение θ отклоняется от 90° (соответствующих X -срезу).

Примеры выбора срезов с ориентацией из вышеописанных областей в случае поиска ПАВ с $K^2 > 0,03\%$ при центральной температуре 38°C приведены в [A15, A18].

3.3.5. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из кварца

На рисунке 22 приведена зависимость расчетных значений максимального ТКЗ TC_{max} и минимального ТКЗ TC_{min} от требуемого значения КЭМС K_{min}^2 . Каждому значению K_{min}^2 соответствуют такие значения TC_{max} и TC_{min} , которые являются, соответственно, максимальным или минимальным среди значений TCD ПАВ, для которых $K^2 \geq K_{min}^2$. Отдельно рассмотрены ПАВ с наименьшей скоростью и ВГБ. Графики для ВГБ проведены сплошными линиями для значений K_{min}^2 , достижимых при толщине эквивалентного слоя алюминия 2,5% от λ или менее. Участки графиков, соответствующие большим значениям K_{min}^2 (достижимых при больших значениях $\frac{h}{\lambda}$), проведены пунктиром.

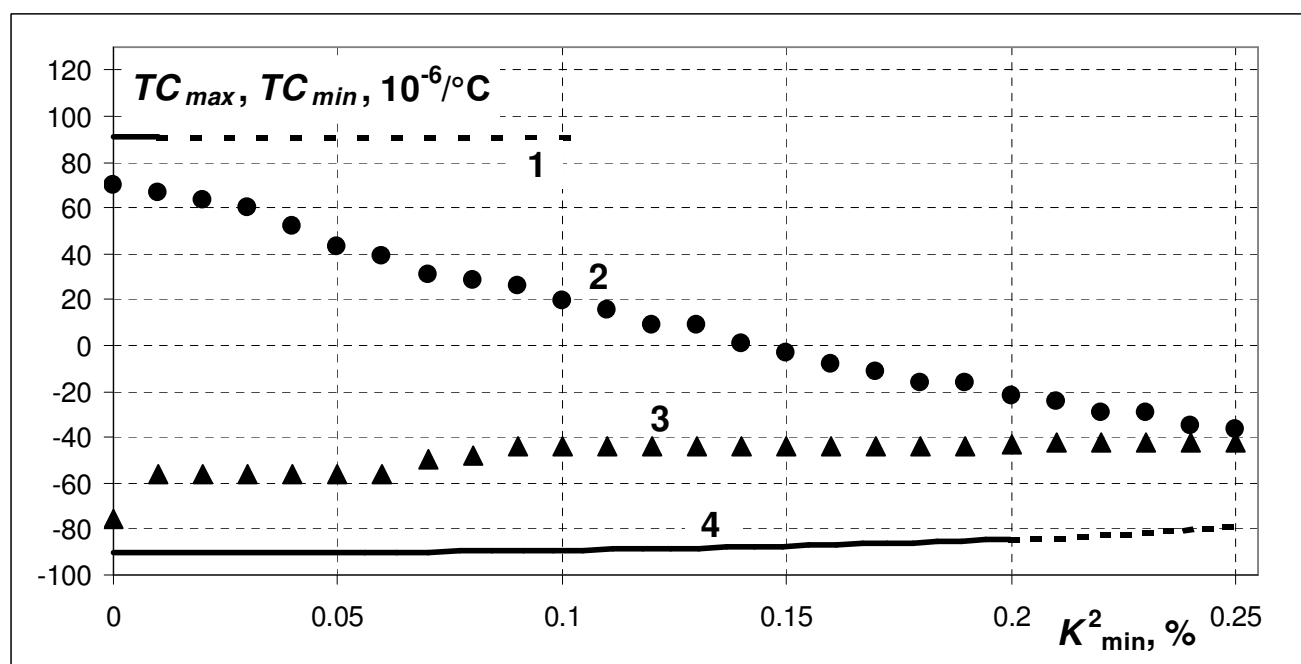


Рис. 22. Зависимость расчетных значений максимального ТКЗ TC_{max} для ВГБ (1) и для ПАВ с наименьшей скоростью (2), минимального ТКЗ TC_{min} для ПАВ с наименьшей скоростью (3) и для ВГБ (4) на кварце от требуемого значения КЭМС K_{min}^2

TC_{max} среди ПАВ с наименьшей скоростью при $K_{min}^2 < 0,07\%$ достигается на подложках, ориентация которых постепенно отклоняется от ориентации (30° , 90° , 105°). При K_{min}^2 , изменяющемся от 0,07% до 0,15% ориентация подложки с TC_{max} постепенно изменяется от (0° , 40° , 55°) до (10° , 50° , 20°), а само значение TC_{max} достигает 0 (т.е. при больших значениях K^2

возможны только отрицательные значения TCD). При дальнейшем увеличении K_{\min}^2 ориентация подложки с TC_{\max} приближается к ориентации подложки ($20^\circ, 55^\circ, 0$), на которой распространяется ПАВ с максимальным $K^2 = 0,26\%$.

TC_{\min} среди ПАВ с наименьшей скоростью при наименьших значениях K_{\min}^2 достигается у ВГБ на подложке с ориентацией ($0, 177^\circ, 90^\circ$). На графике этой подложке соответствует одна точка (при $K_{\min}^2 = 0$), но следует иметь в виду, что в зависимости от толщины электродов значение K^2 может удовлетворять и значениям $K_{\min}^2 \geq 0,01\%$ (например, в случае слоя алюминия с $\frac{h}{\lambda} = 0,5\%$ $K^2 = 0,044\%$). При $K_{\min}^2 < 0,09\%$ ориентация подложки с TC_{\min} находится в области ориентаций, соответствующих различным значениям φ , $160^\circ < \theta < 180^\circ$, $\varphi + 140^\circ < \psi < \varphi + 160^\circ$. При K_{\min}^2 , изменяющемся от $0,09\%$ до $0,19\%$ TC_{\min} достигается на подложке с ориентацией ($30^\circ, 40^\circ, 165^\circ$). При дальнейшем увеличении K_{\min}^2 ориентация подложки с TC_{\min} приближается к ориентации ($20^\circ, 55^\circ, 180^\circ$), что эквивалентно ориентации ($20^\circ, 55^\circ, 0$). На этой подложке (при максимально возможном значении K^2) $TCD = -34 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

На рисунке 23 приведена зависимость максимальной разницы ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} от K_{\min}^2 . Каждому значению K_{\min}^2 соответствуют такое значение Δ_{\max} , которое является максимальным среди значений Δ_{TCF} пар направлений распространения ПАВ, у которых $K^2 \geq K_{\min}^2$ для каждого из двух направлений распространения. Отдельно рассмотрены пары, в которых используются только ПАВ с наименьшей скоростью, и пары, в которых также используется ВГБ с отрицательным TCD и скоростью, превышающей скорость волны Рэлея, распространяющейся в том же направлении (т.е. ВГБ, распространяющаяся на срезах, близких к $70^\circ Y$ -срезу).

Вариант с использованием ВГБ является предпочтительным при $K_{\min}^2 < 0,14\%$. Если $K_{\min}^2 < 0,07\%$, то Δ_{\max} достигается на срезах, которым соответствует диапазон значений θ от 160° до 175° . Для рассматриваемых вариантов с использованием ВГБ значение третьего угла Эйлера, соответствующее направлению распространения ПАВ с минимальным ТКЗ, $\psi_{\min} = 90^\circ$. При $K_{\min}^2 < 0,07\%$ значение третьего угла Эйлера, соответствующее направлению распространения ПАВ с максимальным ТКЗ, ψ_{\max} находится в диапазоне от 75° до 90° (что с учетом симметрии эквивалентно диапазону от 90° до 105°). В этом случае ПАВ с максимальным ТКЗ является квази-рэлеевской волной и распространяется в направлении, близком к направлению распространения ВГБ, что позволяет использовать для размещения пары резонаторов сравнительно малую площадь подложки. Если K_{\min}^2 изменяется от $0,07\%$ до

0,14%, то Δ_{\max} достигается на срезах, которым соответствует диапазон значений θ от 150° до 160° , а ψ_{\max} находится в диапазоне от 0 до 35° .

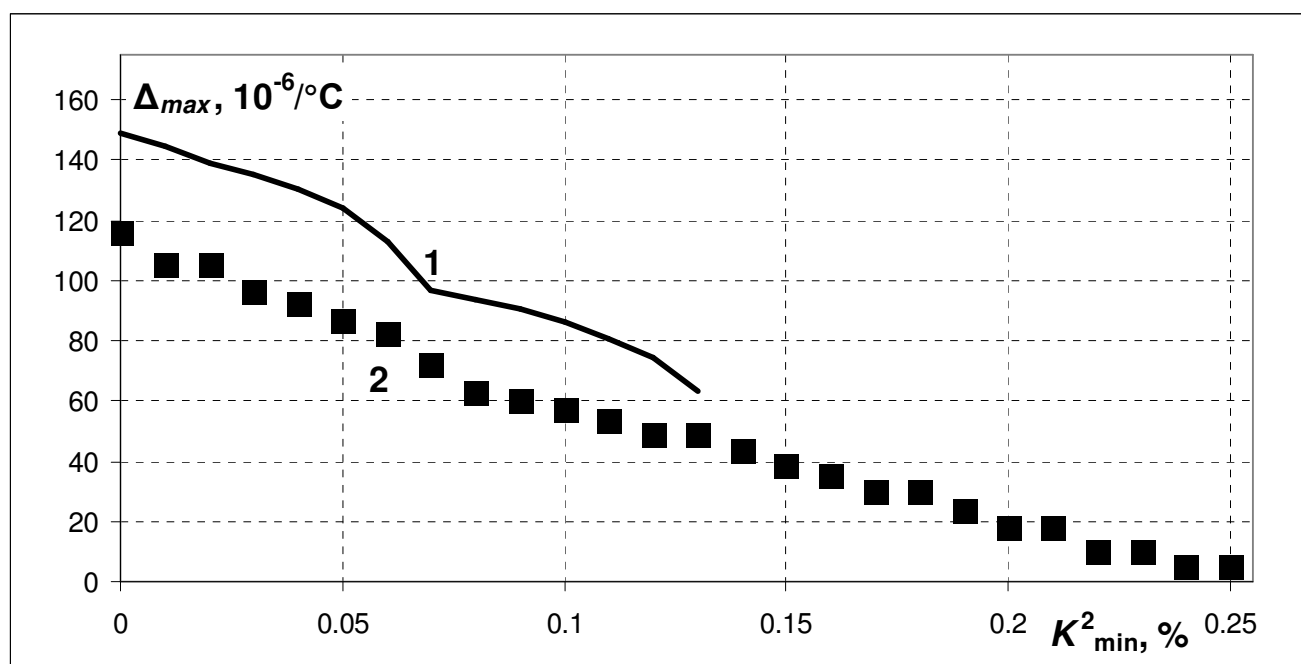


Рис. 23. Зависимость максимальной разницы ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} для пар с использованием ВГБ на срезах, близких к $70^\circ Y$ -срезу, (1) и для пар с использованием только ПАВ с наименьшей скоростью (2) на кварце от требуемого значения

$$\text{КЭМС } K_{\min}^2$$

В случае использования только ПАВ с наименьшей скоростью Δ_{\max} при $K_{\min}^2 < 0,08\%$ достигаются на срезах из области, где $150^\circ < \theta < 175^\circ$, ψ_{\max} близок к $(90^\circ + \varphi)$, а ψ_{\min} к $(30^\circ + \varphi)$. При больших значениях K_{\min}^2 ориентации срезов с Δ_{\max} постепенно приближаются к ориентации среза, на котором достигается максимальный K^2 , ψ_{\min} находится в диапазоне от 165° до 180° , а ψ_{\max} с ростом K_{\min}^2 от 0,08% до 0,25% изменяется от 35° до 0.

Подложки из кварца позволяют получить Δ_{TCF} до $150 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при использовании в одном из резонаторов ВГБ, скорость которых превышает скорость распространяющихся в том же направлении волн Рэлея. При этом возможен выбор среза и направлений распространения используемых ПАВ, позволяющий получить K^2 в обоих направлениях не ниже 0,13% при $\Delta_{TCF} = 63 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ или получить компромиссное сочетание значений этих параметров из диапазонов $0 < K^2 < 0,13\%$ и $63 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C} < \Delta_{TCF} < 150 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Лучший альтернативный вариант позволяет получать на $30..40 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ меньшие значения Δ_{TCF} при значениях K_{\min}^2 менее 0,1%. При больших значениях K_{\min}^2 преимущество в величине Δ_{TCF} от использования лучшего варианта уменьшается. При значениях $K_{\min}^2 > 0,14\%$ наибольшее значение Δ_{TCF} можно получить при

использовании в обоих резонаторах ПАВ с наименьшей скоростью. Выбор среза и направлений распространения ПАВ, позволяет получить компромиссное сочетание значений K^2 и Δ_{TCF} из диапазонов $0,14\% < K^2 < 0,26\%$ и $0 < \Delta_{TCF} < 43 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Предложенный подход к выбору подложки для чувствительного элемента датчика температуры и полученные рекомендации по выбору ориентации подложки из кварца приведены в [A16].

Использование различных подложек для пары резонаторов позволяет получить разницу ТКЧ до $180 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. С учетом наличия в этом случае возможности комбинирования подложек из различных материалов более подробное обсуждение возможностей использования различных подложек для пары резонаторов будет проведено при сравнительном анализе всех рассмотренных здесь материалов.

3.4. Параметры ПАВ на подложках из лангасита

3.4.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из лангасита

В качестве материала для чувствительных элементов датчиков температуры лангасит вызывает интерес главным образом из-за своей работоспособности при температурах до 1000°C [A14, 19, 81, 100]. Для использования в датчиках, измеряющих температуру вблизи комнатной, лангасит может быть интересен тем, что позволяет получить более высокий K^2 по сравнению с кварцем. В [20] несколько подложек из лангасита предлагаются для использования в датчиках температуры на основании результатов расчета, однако при этом не приведены обоснования для выбора именно этих подложек. В данной диссертации впервые проведен анализ результатов расчета параметров ПАВ для всевозможных ориентаций подложки из лангасита применительно к их использованию в качестве подложки для устройства на ПАВ, служащего чувствительным элементом датчика температуры.

На рисунке 24 приведены линии уровня зависимости ТКЗ от углов θ и ψ при двух фиксированных значениях угла φ : 0 и 30° . Аналогичные графики для $\varphi = 10^\circ$ и $\varphi = 20^\circ$, а также линии уровня зависимостей скорости ПАВ V , K^2 и PFA от θ и ψ при четырех фиксированных значениях φ (0 , 10° , 20° и 30°) приведены в приложении (рис. 58 – 61).

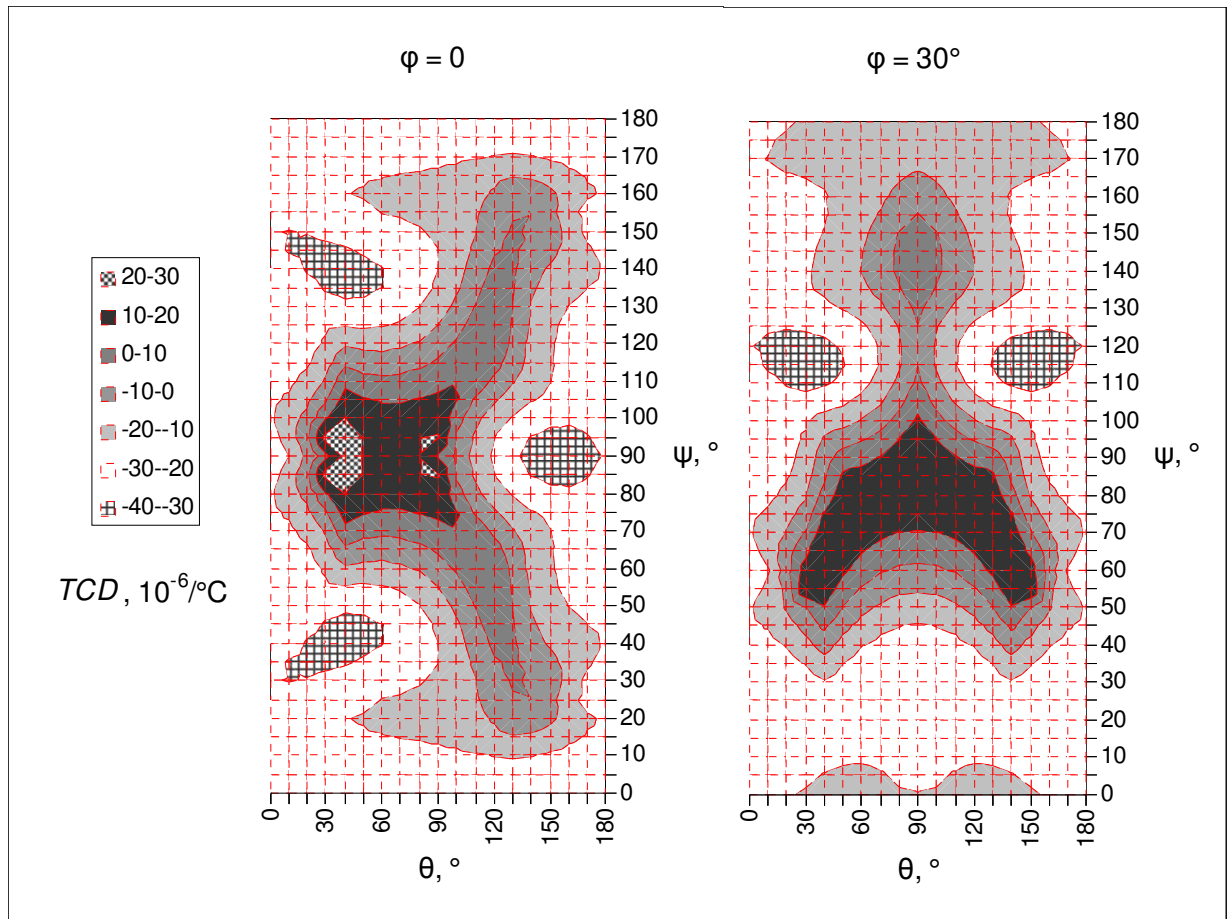


Рис. 24. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из лангасита от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (слева) и $\varphi = 30^\circ$ (справа)

На рисунке 25 приведен график зависимости ТКЗ ВГБ, распространяющейся вдоль свободной поверхности, от угла θ . Графики зависимости V и K^2 от θ приведены в приложении (рис. 62, 63). В случае лангасита скорость ВГБ превышает скорость волны Рэлея на подложках, ориентации которых соответствуют значениям угла θ , находящимся в диапазоне от 22° до 92° . На рисунке границы данной области отмечены вертикальными пунктирными линиями. Горизонтальные пунктирные линии показывают границы диапазона, в котором находятся значения TCD ПАВ с наименьшей скоростью. Как видно на рисунке, в случае лангасита ВГБ со скоростями, превышающими скорость волны Рэлея, наиболее интересны для получения максимальных значений TCD . Минимальное значение TCD достигается у ВГБ со скоростью ниже скорости волны Рэлея. Характеристики ВГБ с минимальным TCD при распространении вдоль свободной поверхности уже получены при расчете ПАВ с наименьшей скоростью, но отдельный интерес представляет их расчет при распространении вдоль поверхности со слоем металла.

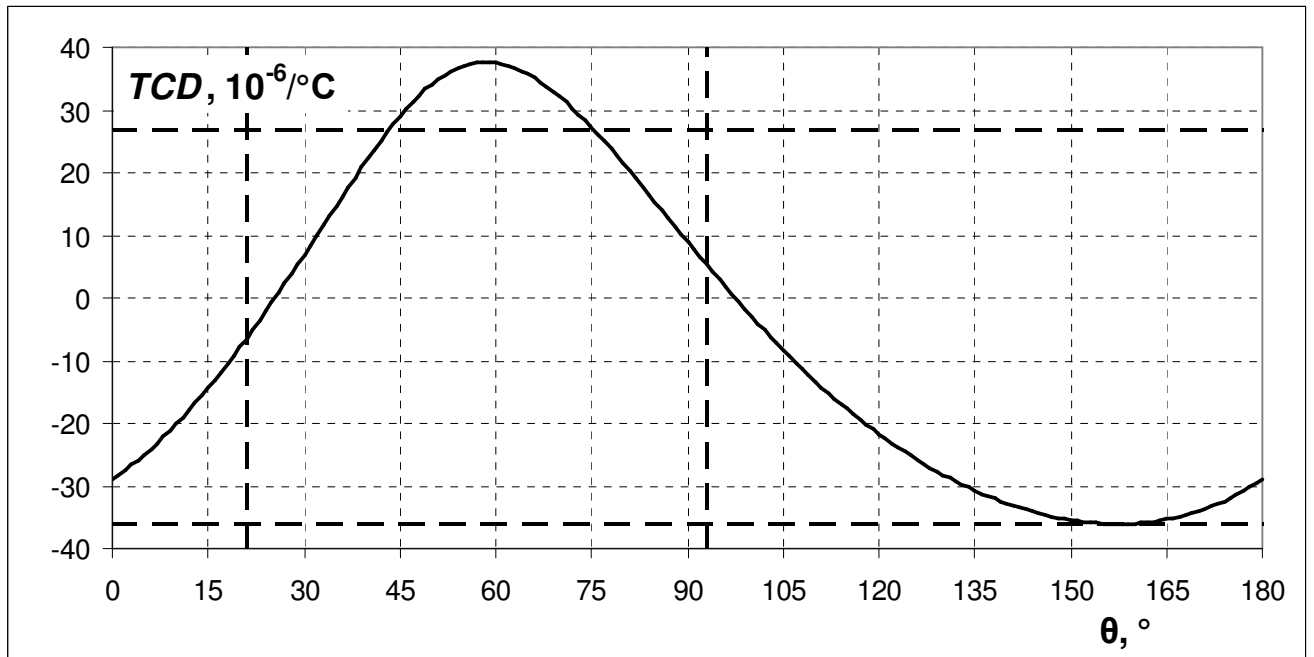


Рис. 25. Зависимость ТКЗ TCD ВГБ на подложках из лангасита от второго угла Эйлера θ

Скорость ВГБ на большей части срезов лангасита ниже, чем скорость поперечной ОАВ в алюминии, а на других срезах превышает ее не более, чем на 10%. Поэтому во многих случаях для получения более высокого K_{eff}^2 могут требоваться электроды из материалов с большей плотностью. В связи с этим K^2 ВГБ на представляющих наибольший интерес срезах лангасита рассчитан как для поверхности со слоем алюминия, так и для поверхности со слоем никеля, меди и золота. Для расчета использовались усредненные модули упругости C_{44} , полученные на основе данных по его механическим и акустическим свойствам, приведенных в [3], (77 ГПа для никеля, 42 ГПа для меди и 29 ГПа для золота); использовались значения плотности, приведенные в [3].

3.4.2. Подложки из лангасита с максимальным и минимальным ТКЗ

Максимальный ТКЗ согласно расчета имеет величину $38 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и достигается при распространении ВГБ на $-32^\circ Y$ -срезах (соответствующие углы Эйлера $(0, 58^\circ, 90^\circ)$). При наличии на поверхности слоя алюминия толщиной 0,5% от λ $K^2 = 0,001\%$. На рисунке 26 приведены зависимости расчетного K^2 от толщины пленки из различных металлов для данного среза. Срез, на котором достигается максимальный TCD , очень близок к срезу, на котором

достигается максимальная скорость ВГБ. Поскольку она превышает скорость поперечной ОАВ в алюминии, слой алюминия приводит к снижению скорости ВГБ и повышению K^2 .

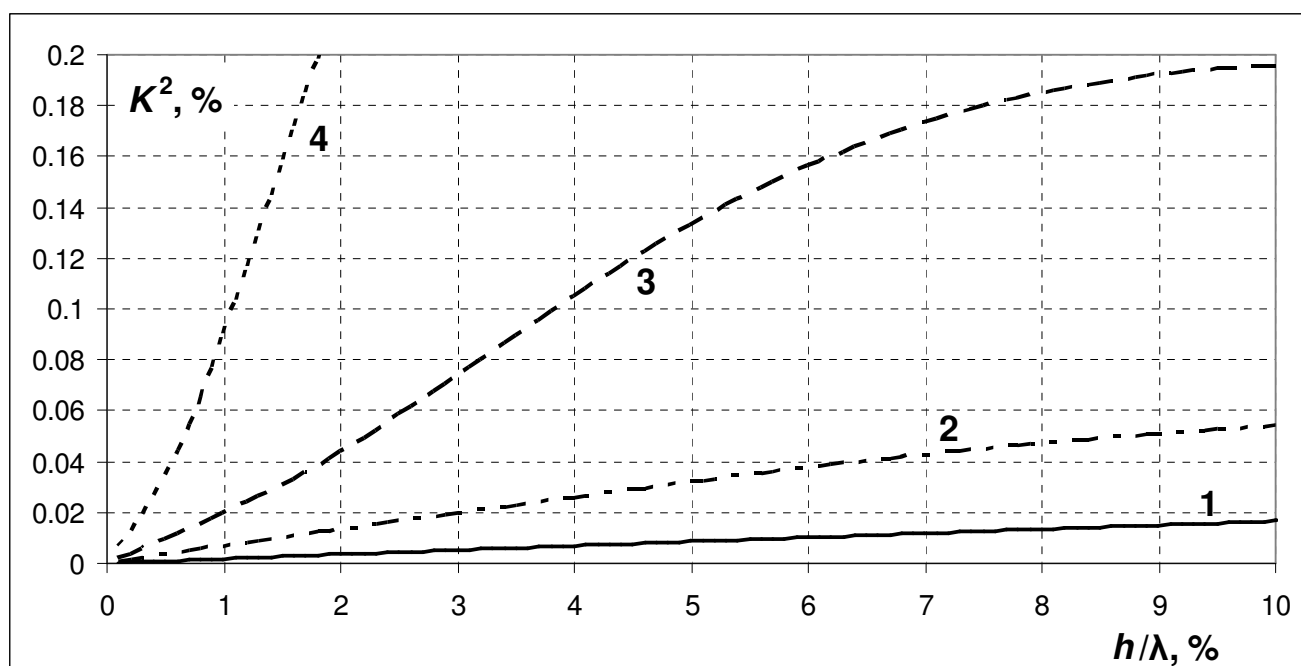


Рис. 26. Зависимость КЭМС K^2 ВГБ на $-32^\circ Y$ -срезе лангасита от толщины слоя металла h , отнесенной к длине волны λ (1 – алюминий, 2 – никель, 3 – медь, 4 – золото)

Достижение приемлемых значений КЭМС требует использования электродов из весьма толстого алюминия или использования электродов из материалов с высокой плотностью. K^2 около 0,1% не достигается даже при толщине эквивалентного слоя алюминия 10% от λ . Учитывая это, можно уверенно говорить о том, что представляют интерес альтернативные варианты подложек с высокими значениями ТКЗ. Надо заметить, что алюминиевое покрытие несколько увеличивает ТКЗ, что в данном случае является улучшением данного параметра. Дополнительным фактором, обуславливающим интерес к альтернативным вариантам подложек с высокими значениями ТКЗ, является превышение скоростью ВГБ скорости одной из ОАВ и возможные связанные с этим дополнительные потери энергии.

Минимальный ТКЗ согласно расчету имеет величину $-36 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и достигается при распространении волны ВГБ на $67^\circ Y$ -срезе (соответствующие углы Эйлера (0, 157° , 90°)). При распространении ВГБ вдоль свободной поверхности $K^2 = 0,04\%$, при распространении вдоль поверхности, покрытой бесконечно тонкой идеально проводящей пленкой, $K^2 = 0,08\%$. Срез, на котором достигается минимальный TCD , близок к срезу, на котором достигается минимальная скорость ВГБ, которая, в частности, значительно ниже скорости поперечной ОАВ в алюминии или никеле. Поэтому покрытия из этих материалов не только не способствуют повышению K^2 ,

но и создают такие граничные условия, при которых ВГБ не существует. На рисунке 27 приведена зависимость расчетного K^2 от толщины пленки из меди и золота.

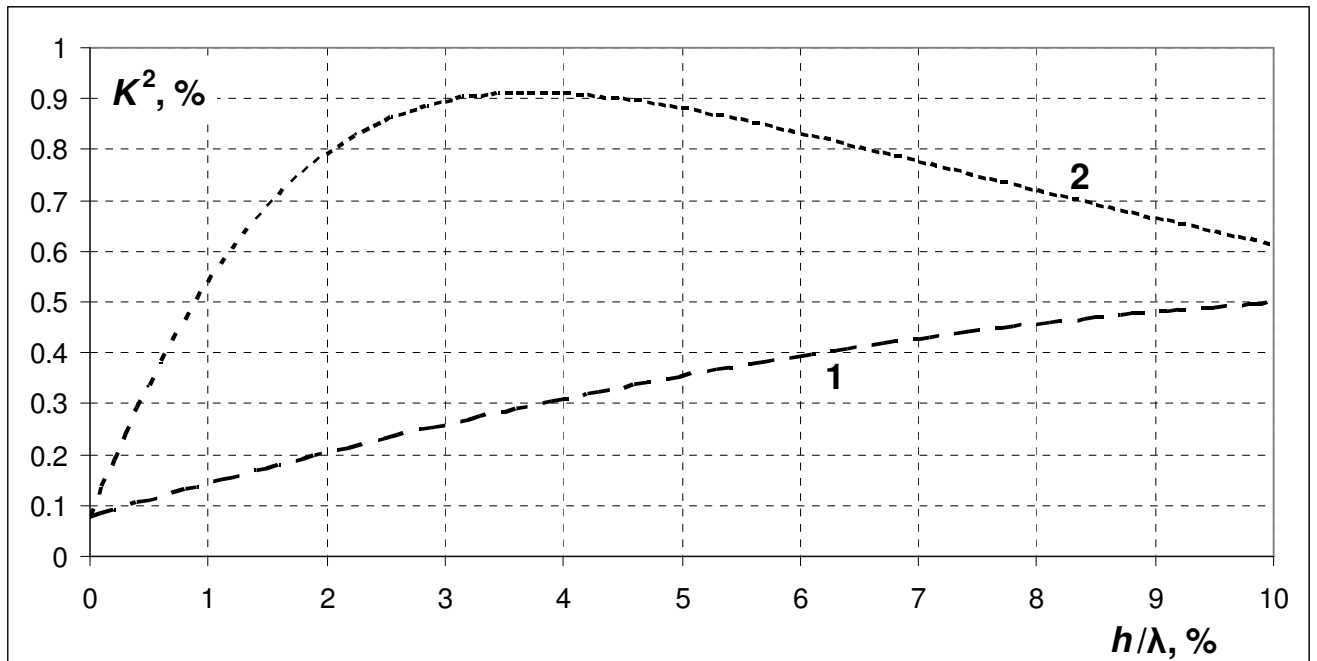


Рис. 27. Зависимость КЭМС K^2 ВГБ на $67^\circ Y$ -срезе лангасита от толщины слоя металла h , отнесенной к длине волны λ (1 – медь, 2 – золото)

Структура из электродов влияет на характеристики ПАВ подобно слою из материала с меньшей упругостью и большей плотностью. Поэтому, возможно, алюминиевые электроды применимы на данной подложке. Расчет для слоев из меди и золота демонстрирует возможность повышения значения K^2 на данном срезе (для сравнения максимальное значение K^2 при распространении ПАВ вдоль свободной поверхности составляет около 0,52%), однако они ограничены увеличением технологического разброса параметров устройств и снижением достижимых уровней Q , присущему использованию электродов из материалов с высокой плотностью. В дальнейшем, при рассмотрении взаимосвязи достижения минимальных значений TCD , максимальных значений Δ_{TCF} и максимальных значений K^2 будем полагать, что на данной подложке $K^2 \approx 0,1\%$.

3.4.3. Области ориентации подложек из лангасита с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС

Максимальный ТКЗ ПАВ с наименьшей скоростью согласно расчета имеет величину около $27 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ПАВ на подложках, ориентация которых находится в области ориентаций, соответствующих $\varphi < 20^{\circ}$, $30^{\circ} < \theta < 50^{\circ}$, $80^{\circ} - \varphi < \psi < 100^{\circ} - \varphi$. В данной области можно выбрать ориентацию подложки, позволяющую получить сочетание $TCD > 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ с K^2 , достигающим 0,12%. Область ориентации подложек вокруг локального максимума TCD (имеющего величину около $21 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), существующего вблизи ориентации $(10^{\circ}, 90^{\circ}, 90^{\circ})$ не представляет интереса, поскольку сравнительно высокие значения TCD достигаются только при K^2 намного меньше 0,12%.

Вокруг ориентации с минимальным $TCD = -36 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (ВГБ на 67°Y -срезе, углы Эйлера $(0, 157^{\circ}, 90^{\circ})$) существует область ориентаций со сравнительно низкими значениями TCD . Например, $TCD < -30 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ может достигаться при различных значениях φ , $130^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$, $75^{\circ} + \varphi < \psi < 100^{\circ} + \varphi$ (при этом K^2 может достигать 0,2%).

Локальный минимум TCD существует в области ориентаций подложки, соответствующих различным значениям φ , $0 < \theta < 75^{\circ}$, $130^{\circ} - \varphi < \psi < 160^{\circ} - \varphi$. Минимальное значение TCD в этой области отличается от минимального значения TCD ВГБ не более чем на $2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. В указанной области ориентаций подложки также может достигаться $TCD < -30 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, при этом K^2 может достигать 0,3%. Таким образом, данная область выглядит предпочтительнее для получения сочетания низких значений TCD и высоких значений K^2 .

3.4.4. Срезы лангасита для использования единой подложки для пары резонаторов

Максимум Δ_{TCF} согласно расчету составляет $69 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается на -34°Y -срезе при использовании ВГБ с $TCD = 37 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и ПАВ с $TCD = -32 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, распространяющейся под углом 42° к оси X. Данному срезу соответствуют углы Эйлера $\varphi = 0$ и $\theta = 56^{\circ}$, а направлениям распространения ПАВ соответствуют углы Эйлера $\psi_{\max} = 90^{\circ}$ и $\psi_{\min} = 42^{\circ}$. ПАВ с отрицательным TCD имеет $K^2 = 0,2\%$. При наличии на поверхности подложки слоя алюминия K^2 ВГБ на данном срезе в 1,5 – 2 раза выше, чем на -32°Y -срезе, (при $\frac{h}{\lambda} = 0,5\%$ $K^2 = 0,0016\%$).

То есть приемлемые значения K^2 могут быть достигнуты только при использовании электродов из весьма толстого алюминия или электродов из материалов с высокой плотностью.

При использовании ПАВ только с наименьшей скоростью наибольшие значения Δ_{TCF} достигаются при использовании срезов, которым соответствуют значения θ от 20° до 40° и различные значения φ . Значения ψ_{\max} и ψ_{\min} находятся вблизи $(90^\circ - \varphi)$ и $(145^\circ - \varphi)$, соответственно. При отсутствии требований к K^2 и другим характеристикам ПАВ Δ_{TCF} в данной области достигает $61 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Локальный максимум Δ_{TCF} достигается также при использовании срезов, которым соответствуют значения θ от 135° до 155° и различные значения φ . Значения ψ_{\max} и ψ_{\min} находятся вблизи $(30^\circ + \varphi)$ и $(90^\circ + \varphi)$, соответственно. При отсутствии требований к K^2 и другим характеристикам ПАВ Δ_{TCF} в данной области достигает $54 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

3.4.5. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из лангасита

На рисунке 28 приведена зависимость расчетных значений TC_{\max} и TC_{\min} от K_{\min}^2 . Отдельно рассмотрены ПАВ с наименьшей скоростью и ВГБ с максимальным TCD . График для ВГБ проведен сплошной линией для значений K_{\min}^2 , достижимых при толщине эквивалентного слоя алюминия 2,5% от λ или менее, и пунктиром для больших значений K_{\min}^2 (в данном случае участок, проведенный сплошной линией, практически незаметен на рисунке).

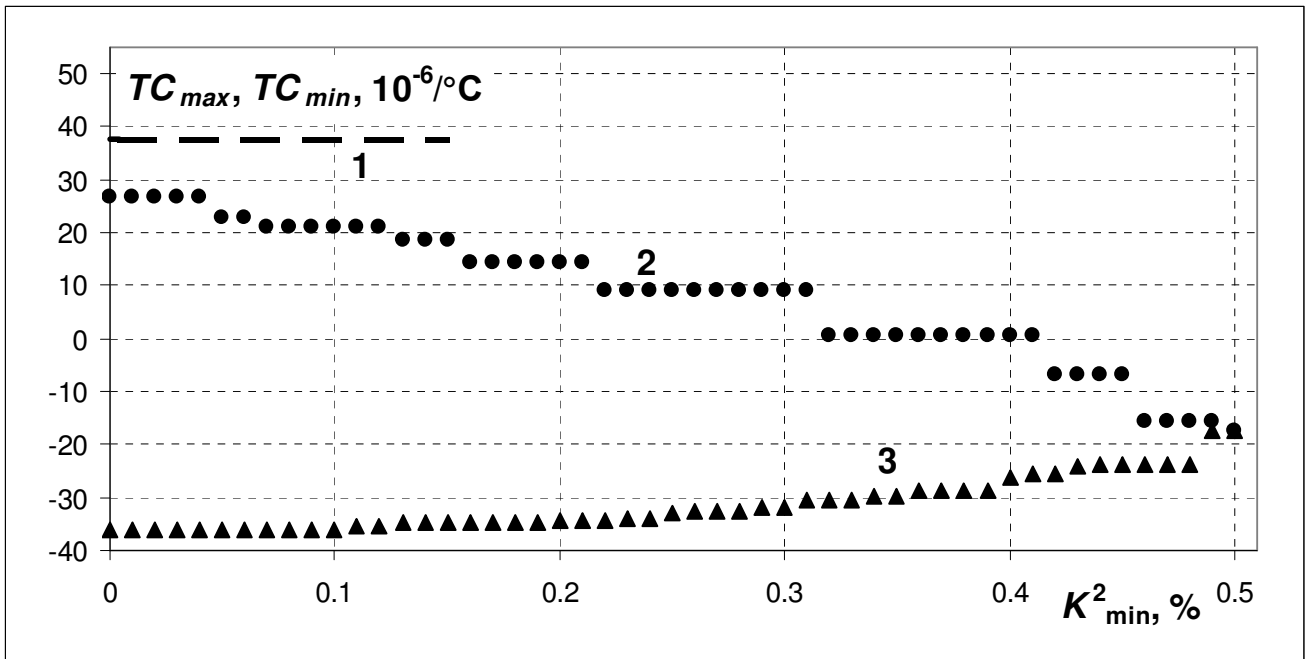


Рис. 28. Зависимость расчетных значений максимального ТКЗ TC_{max} для ВГБ (1) и для ПАВ с наименьшей скоростью (2), минимального ТКЗ TC_{min} (3) на лангасите от требуемого значения КЭМС K_{min}^2

TC_{max} среди ПАВ с наименьшей скоростью при $K_{min}^2 < 0,22\%$ достигается на подложках, ориентация которых находится в области, соответствующей различным значениям φ , $25^\circ < \theta < 40^\circ$, $80^\circ - \varphi < \psi < 100^\circ - \varphi$. При K_{min}^2 , изменяющемся от 0,22% до 0,45%, ориентация подложки с TC_{max} находится вблизи локального максимума K^2 в области ориентаций подложки, соответствующих различным значениям φ , $140^\circ < \theta < 170^\circ$, $20^\circ + \varphi < \psi < 35^\circ + \varphi$. При дальнейшем увеличении K_{min}^2 ориентация подложки с TC_{max} приближается к ориентации подложки $(20^\circ, 140^\circ, 0)$, на которой распространяется ПАВ с максимальным $K^2 = 0,52\%$.

TC_{min} среди ПАВ с наименьшей скоростью при наименьших значениях K_{min}^2 достигается у ВГБ на подложке с ориентацией $(0, 157^\circ, 90^\circ)$. На графике этой подложке соответствуют точки со значениями K_{min}^2 от 0 до 0,1%, хотя следует иметь в виду, что значение K^2 ВГБ может значительно отличаться от 0,1% в зависимости от толщины и материала электродов. При K_{min}^2 , изменяющемся от 0,11% до 0,25%, ориентация подложки с TC_{min} находится в области ориентаций, соответствующих различным значениям φ , $20^\circ < \theta < 50^\circ$, $120^\circ < \psi < 150^\circ$. При K_{min}^2 , изменяющемся от 0,25% до 0,4%, ориентация подложки с TC_{min} находится в области ориентаций, соответствующих различным значениям φ , $20^\circ < \theta < 50^\circ$, $15^\circ < \psi < 35^\circ$. При K_{min}^2 , изменяющемся от 0,4% до 0,48%, ориентация подложки с TC_{min} находится в области ориентаций, соответствующих $\varphi = 30^\circ$, $30^\circ < \theta < 70^\circ$, $5^\circ < \psi < 20^\circ$. При дальнейшем увеличении

K_{\min}^2 ориентация подложки с TC_{\min} приближается к ориентации $(20^\circ, 140^\circ, 0)$ с максимальным K^2 и $TCD = -17 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

На рисунке 29 приведена зависимость Δ_{\max} от K_{\min}^2 . Отдельно рассмотрены пары резонаторов, в которых используются только ПАВ с наименьшей скоростью. Помимо графика для таких пар на рисунке отмечен уровень Δ_{\max} , соответствующий паре резонаторов, в одном из которых используется ВГБ с положительным TCD и скоростью, превышающей скорость волны Рэлея, распространяющейся в том же направлении (на $-34^\circ Y$ -срезе). Соответствующая линия проведена сплошной для значений K_{\min}^2 , достижимых при толщине эквивалентного слоя алюминия 2,5% от λ или менее, и проведена пунктиром для больших значений K_{\min}^2 .

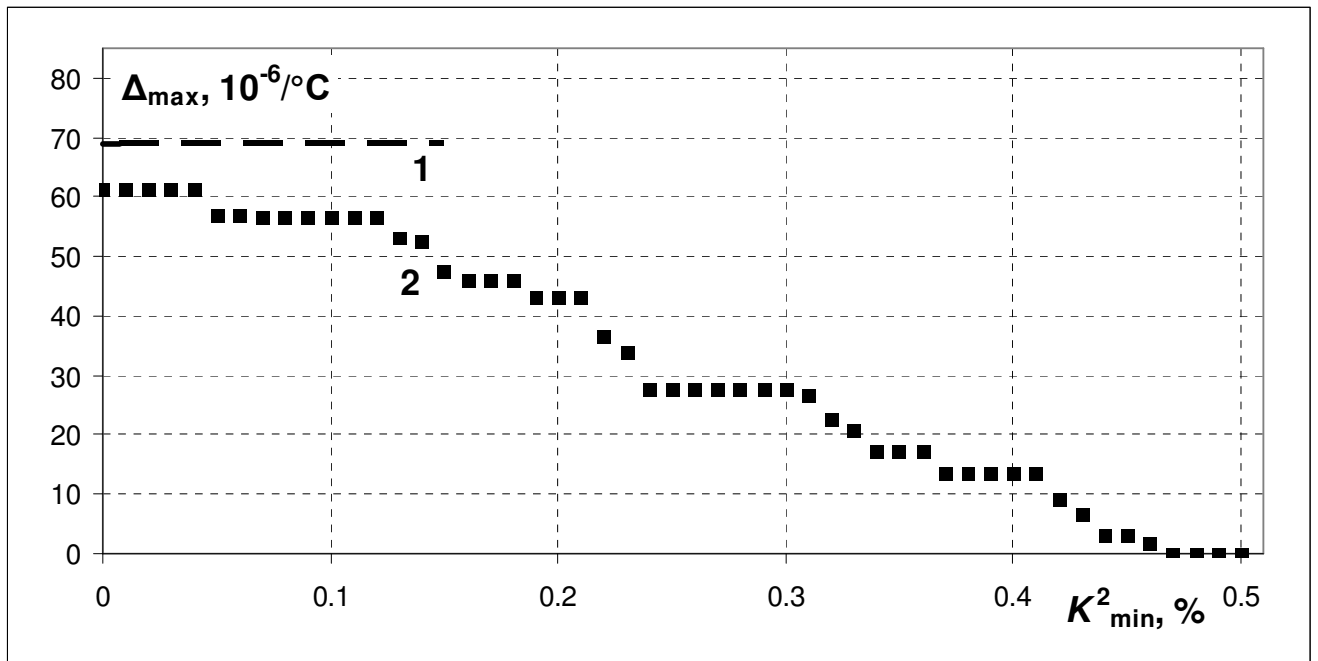


Рис. 29. Зависимость максимальной разницы ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} для пар с использованием ВГБ на $-34^\circ Y$ -срезе (1) и для пар с использованием только ПАВ с наименьшей скоростью (2) на лангсите от требуемого значения КЭМС K_{\min}^2

В случае использования только ПАВ с наименьшей скоростью Δ_{\max} при $K_{\min}^2 < 0,23\%$ достигаются на срезах из области, где $20^\circ < \theta < 40^\circ$, ψ_{\max} близок к $(90^\circ - \varphi)$, а ψ_{\min} к $(145^\circ - \varphi)$. При K_{\min}^2 , изменяющемся от 0,24% до 0,36%, ориентация среза и направление ψ_{\max} находится вблизи локального максимума K^2 в области ориентаций подложки, соответствующих $140^\circ < \theta < 170^\circ$, $20^\circ + \varphi < \psi < 35^\circ + \varphi$. При K_{\min}^2 близком к 0,24% ψ_{\min} находится вблизи локального максимума K^2 в области тех же срезов с направлениями распространения $90^\circ + \varphi < \psi < 105^\circ + \varphi$. При K_{\min}^2 , изменяющемся от 0,25% до 0,36%, ψ_{\min} близко к 0 или 180° , что соответствует ориентации подложек, близким к ориентации с глобальным максимумом K^2 . При больших

значениях K_{\min}^2 ориентации срезов с Δ_{\max} постепенно приближаются к ориентации среза, на котором достигается максимальный K^2 , ψ_{\min} находится в диапазоне от 0 до 15° , а ψ_{\max} находится в диапазоне от 165° до 180° .

Подложки из лангасита позволяют получить Δ_{TCF} до $69 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при использовании в одном из резонаторов ВГБ, скорость которых превышает скорость распространяющихся в том же направлении волн Рэлея. Однако применение данного варианта ограничено тем, что для получения приемлемых значений K^2 ВГБ в данном случае необходимы электроды из весьма толстого алюминия или из материалов с высокой плотностью. При использовании только ПАВ с наименьшей скоростью возможно достижение значений Δ_{TCF} до $61 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Максимальный достижимый Δ_{TCF} значительно ниже, чем на подложках из кварца. Но при K_{\min}^2 около 0,15% и выше подложки из лангасита позволяют получить большие значения Δ_{TCF} , чем подложки из кварца. При значениях K_{\min}^2 около 0,25% и выше (не достижимых на подложках из кварца при использовании алюминиевых электродов типичной толщины) на подложках из лангасита возможно достижение значений Δ_{TCF} до $28 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Использование различных подложек из лангасита для пары резонаторов позволяет получить разницу ТКЧ до $74 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при использовании ВГБ с максимальным TCD и до $63 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при использовании только ПАВ с наименьшей скоростью. Более подробное обсуждение возможностей использования различных подложек для пары резонаторов будет проведено при сравнительном анализе всех рассмотренных здесь материалов.

3.5. Параметры ПАВ на подложках из танталата лития

3.5.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из танталата лития

Танталат лития не является распространенным материалом подложек для чувствительных элементов датчиков на ПАВ. Но он может быть интересен для данного применения, поскольку обладает сочетанием возможности получения больших значений K^2 , чем на подложках из кварца и лангасита, и большего чем у ниобата лития диапазона значений TCD , принимаемых при различных ориентациях подложек. В [20] несколько подложек из танталата лития предлагаются для использования в датчиках температуры на основании результатов расчета, однако при этом не приведены обоснования для выбора именно этих

подложек. В данной диссертации впервые проведен анализ результатов расчета параметров ПАВ для всевозможных ориентаций подложки из танталата лития применительно к их использованию в качестве подложки для устройства на ПАВ, служащего чувствительным элементом датчика температуры.

На рисунке 30 приведены линии уровня зависимости ТКЗ от углов θ и ψ при двух фиксированных значениях угла φ : 0 и 30° . Аналогичные графики для $\varphi = 10^\circ$ и $\varphi = 20^\circ$, а также линии уровня зависимостей скорости ПАВ V , K^2 и PFA от θ и ψ при четырех фиксированных значениях φ (0, 10° , 20° и 30°) приведены в приложении (рис. 64 – 67). В случае танталата лития скорость ПВР ниже скорости горизонтально-поперечной ОАВ при всех значениях угла θ . Таким образом, все невытекающие ПАВ описаны расчетом параметров ПАВ с наименьшей скоростью.

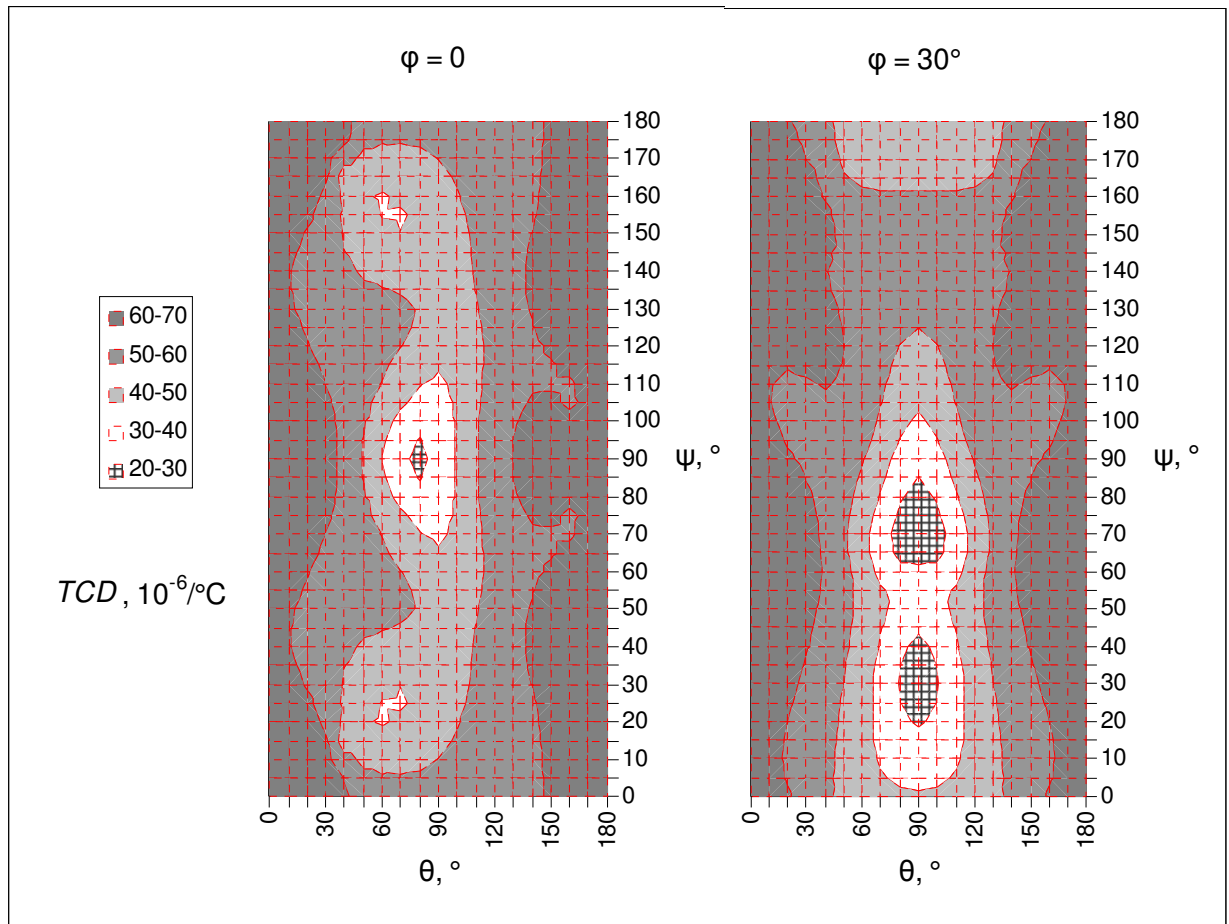


Рис. 30. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из танталата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (слева) и $\varphi = 30^\circ$ (справа)

3.5.2. Области ориентации подложек из танталата лития с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС

Максимальный ТКЗ ПАВ имеет величину около $70 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ПАВ на подложках, близких к Z - Y -срезу (углы Эйлера $(\varphi, 0, 30^{\circ} - \varphi + 60^{\circ}n)$ или $(\varphi, 180^{\circ}, 30^{\circ} + \varphi + 60^{\circ}n)$, где n – целое число). Максимальное значение TCD практически не отличается от значения TCD ПАВ, распространяющейся на Z - Y -срезе (разница не превышает $1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). В области высоких значений TCD вблизи Z -среза TCD слабо изменяется при изменении ориентации среза и направления распространения ПАВ. Например, ПАВ, распространяющиеся на всех подложках с $\theta < 10^{\circ}$ или $\theta > 170^{\circ}$ (т.е. во всех направлениях на всех срезах, отклоненных от Z -среза менее чем на 10°), имеют $TCD > 60 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; а в случае $\theta < 35^{\circ}$ или $\theta > 145^{\circ}$ значения $TCD > 50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. В данной области ориентаций подложки можно выбрать ориентацию, позволяющую получить сочетание $TCD > 60 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ с K^2 , достигающим 1,5%. В ней также достигается максимум K^2 около 2%, ПАВ с максимальным K^2 имеет значение TCD около $54 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Минимальный $TCD = 22 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ПАВ на X -срезе в направлении, отклоненном примерно на 69° от оси Y в сторону оси $-Z$ (углы Эйлера $(30^{\circ}, 90^{\circ}, 69^{\circ})$ или $(90^{\circ}, 90^{\circ}, 111^{\circ})$). Данной ориентации подложки соответствует $K^2 = 0,9\%$, $PFA = 15^{\circ}$ и $\gamma = -0,3$. Локальный минимум $TCD = 26 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ также достигается при распространении ПАВ на X -срезе, в направлении, отклоненном примерно на 33° от оси Y в сторону оси $-Z$ (углы Эйлера $(30^{\circ}, 90^{\circ}, 33^{\circ})$ или $(90^{\circ}, 90^{\circ}, 147^{\circ})$). Данной ориентации подложки соответствует $K^2 = 1,3\%$, $PFA = 2^{\circ}$ и $\gamma = -0,1$. Вокруг этих двух минимумов существует область ориентаций подложки со сравнительно низкими значениями ТКЗ (например, $TCD < 40 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ может достигаться при $\varphi = 30^{\circ}$, $60^{\circ} < \theta < 120^{\circ}$, $0 < \psi < 105^{\circ}$, при меньших значениях φ соответствующие диапазоны значений θ и ψ сужаются).

3.5.3. Срезы танталата лития для использования единой подложки для пары резонаторов

Максимальное значение Δ_{max} согласно расчету составляет $33 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается на X -срезе. ПАВ с максимальным для X -среза TCD распространяется в направлении, отклоненном примерно на 37° от оси Y в сторону оси Z (углы Эйлера $(30^{\circ}, 90^{\circ}, 143^{\circ})$ или $(90^{\circ}, 90^{\circ}, 37^{\circ})$). Данному направлению распространения ПАВ соответствует $K^2 = 0,09\%$, $PFA = 1,7^{\circ}$ и $\gamma = 0,1$.

Также на X -срезе достигается локальный максимум $\Delta_{\max} = 16 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ при использовании как ψ_{\min} , так и ψ_{\max} , соответствующих области ориентаций подложки с низкими значениями TCD . В этом случае ПАВ высоким ТКЗ распространяется в направлении, отклоненном примерно на 54° от оси Y в сторону оси $-Z$ (углы Эйлера $(30^{\circ}, 90^{\circ}, 54^{\circ})$ или $(90^{\circ}, 90^{\circ}, 126^{\circ})$). Данному направлению распространения соответствует $K^2 = 1,2\%$, $PFA = 0,1^{\circ}$ и $\gamma = 0,2$.

Другой локальный максимум Δ_{\max} существует вблизи среза с ориентацией, соответствующей $\varphi = 10^{\circ}$ и $\theta = 50^{\circ}$, со значениями ψ_{\min} и ψ_{\max} , близкими к 15° и 145° , соответственно. Значения TCD для одних и других направлений распространения находятся в диапазонах от $35 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $45 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и от $50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $55 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, соответственно. При этом возможно достижение значений K^2 до $1,2\%$ для обеих ПАВ одновременно.

3.5.4. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из танталата лития

На рисунке 31 приведена зависимость расчетных значений TC_{\max} и TC_{\min} от K_{\min}^2 . TC_{\max} при $K_{\min}^2 < 0,95\%$ TC_{\max} достигается на подложках, ориентация которых находится в области ориентаций, соответствующих различным значениям φ , $165^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$, $25^{\circ} + \varphi < \psi < 40^{\circ} + \varphi$ или $140^{\circ} + \varphi < \psi < 155^{\circ} + \varphi$. При K_{\min}^2 , изменяющемся от $0,95\%$ до $1,25\%$, ориентация подложки с TC_{\max} находится вблизи локального максимума K^2 в области ориентации подложки, соответствующей различным значениям φ , $10^{\circ} < \theta < 50^{\circ}$, $15^{\circ} - \varphi < \psi < 30^{\circ} - \varphi$. При дальнейшем увеличении K_{\min}^2 ориентация подложки с TC_{\max} находится в области ориентаций подложки, соответствующих различным значениям φ , $10^{\circ} < \theta < 50^{\circ}$, $145^{\circ} - \varphi < \psi < 175^{\circ} - \varphi$, и приближается к ориентации подложки $(10^{\circ}, 40^{\circ}, 160^{\circ})$, на которой распространяется ПАВ с максимальным $K^2 = 2\%$.

TC_{\min} при $K_{\min}^2 < 0,9\%$ достигается на подложке с ориентацией $(30^{\circ}, 90^{\circ}, 69^{\circ})$, соответствующей глобальному минимуму TCD ; при $K_{\min}^2 < 1,5\%$ TC_{\min} достигается при различных направлениях распространения на этом же срезе. При K_{\min}^2 , изменяющемся от $0,9\%$ до $0,95\%$, соответствующее TC_{\min} значение ψ смещается ближе к 60° ; при K_{\min}^2 , изменяющемся от $0,95\%$ до $1,2\%$, TC_{\min} достигается при $\psi = 33^{\circ}$; при K_{\min}^2 , изменяющемся от $1,2\%$ до $1,45\%$, соответствующее TC_{\min} значение ψ смещается ближе к 45° . При дальнейшем увеличении K_{\min}^2

ориентация подложки с TC_{min} приближается к ориентации (10° , 40° , 160°) с максимальным K^2 и $TCD = 54 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

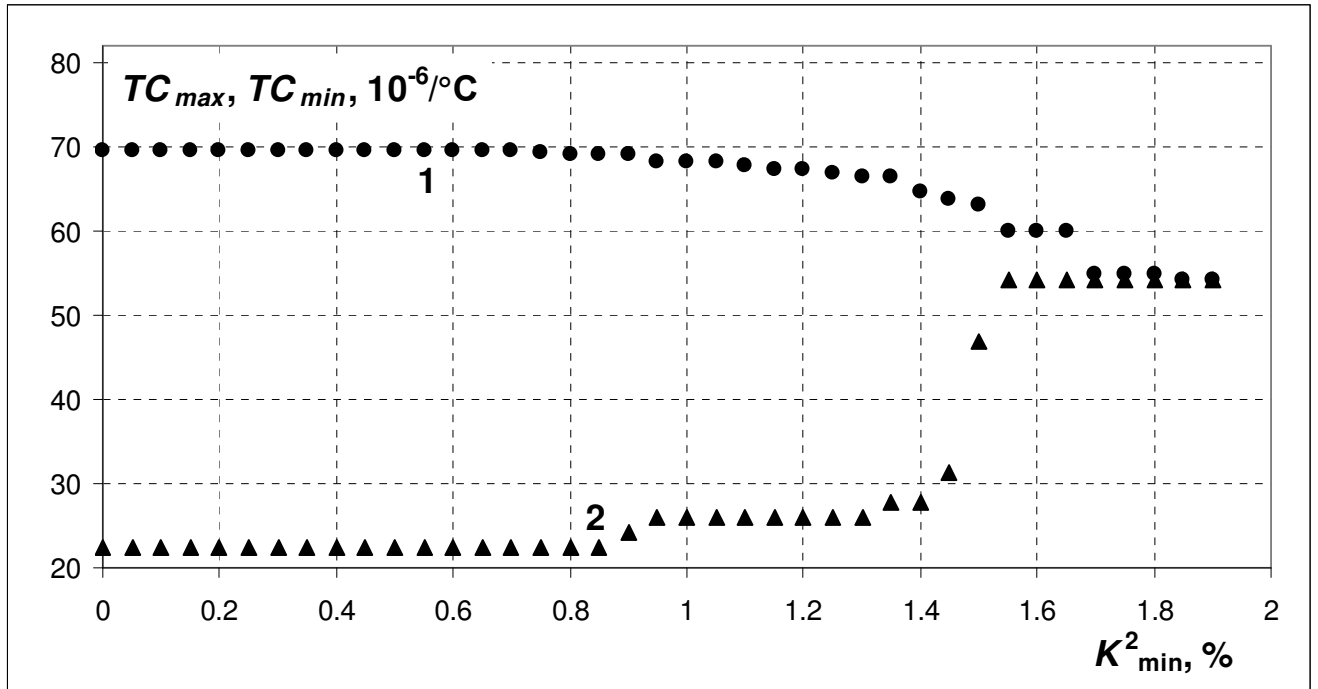


Рис. 31. Зависимость расчетных значений максимального ТКЗ TC_{max} (1) и минимального ТКЗ TC_{min} (2) на танталате лития от требуемого значения КЭМС K_{min}^2

На рисунке 32 приведена зависимость Δ_{max} от K_{min}^2 . Δ_{max} при $K_{min}^2 < 0,45\%$ достигаются на срезах из области, где $\varphi > 15^\circ$ и $75^\circ < \theta \leq 90^\circ$; направления распространения ПАВ соответствуют диапазонам $135^\circ < \psi_{max} < 175^\circ$ и $65^\circ < \psi_{min} < 85^\circ$. При больших значениях K_{min}^2 ориентации срезов с Δ_{max} постепенно приближаются к ориентации среза, на котором достигается максимальный K^2 ; ψ_{max} приближается к значению, соответствующему направлению распространения ПАВ с максимальным K^2 . При K_{min}^2 , изменяющемся от 0,45% до 0,75%, $75^\circ < \psi_{min} < 85^\circ$; при K_{min}^2 , изменяющемся от 0,75% до 1,2%, $5^\circ < \psi_{min} < 25^\circ$. При K_{min}^2 , изменяющемся от 1,2% до 1,4%, Δ_{max} достигаются на X-срезе с ψ_{min} и ψ_{max} , находящимися в области низких значений TCD . При больших значениях K_{min}^2 Δ_{max} снова достигаются на срезах, близких к срезу с максимальным K^2 ; при этом и ψ_{max} , и ψ_{min} приближаются к значению, соответствующему направлению распространения ПАВ с максимальным K^2 .

Подложки из танталата лития позволяют получить Δ_{TCF} до $33 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Максимальный достижимый Δ_{TCF} значительно ниже, чем на подложках из кварца и лангасита. Но при значениях K_{min}^2 около 0,35% и выше подложки из танталата лития позволяют получить большие значения Δ_{TCF} , чем подложки из лангасита. При значениях K_{min}^2 около 0,5% и выше (не

достижимых на подложках из лангасита при использовании алюминиевых электродов типичной толщины) на подложках из танталата лития возможно достижение значений Δ_{TCF} до $24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Использование различных подложек из танталата лития для пары резонаторов позволяет получить разницу ТКЧ до $47 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Более подробное обсуждение возможностей использования различных подложек для пары резонаторов будет проведено при сравнительном анализе всех рассмотренных здесь материалов.

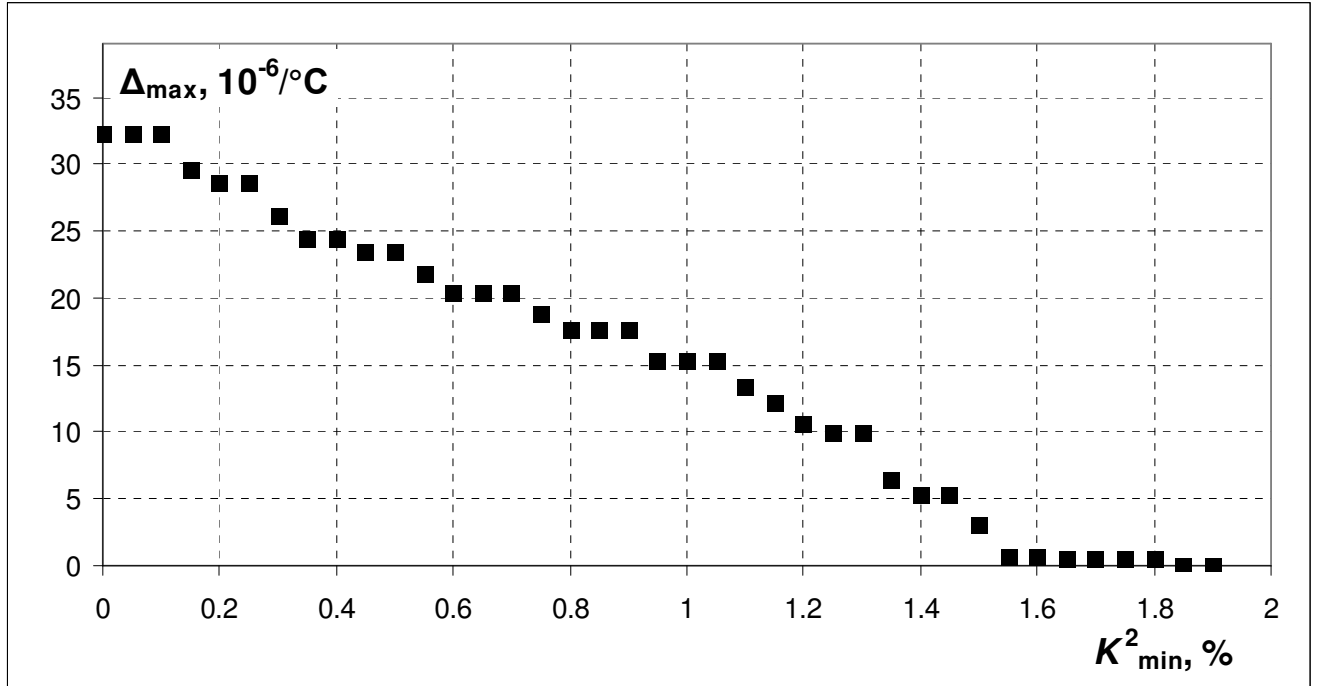


Рис. 32. Зависимость максимальной разницы ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} на танталате лития от требуемого значения КЭМС K_{\min}^2

3.6. Параметры ПАВ на подложках из ниобата лития

3.6.1. Результаты расчета параметров ПАВ на подложках из ниобата лития

Среди материалов, широко используемых для изготовления устройств на ПАВ, ниобат лития позволяет получить наибольший КЭМС. Он является наиболее широко используемым материалом для применения в датчиках температуры также и за счет высоких значений ТКЗ распространяющихся в нем ПАВ. Известно множество примеров использования в качестве датчиков температуры устройств на ПАВ, выполненных на подложках из ниобата лития, в том числе резонаторов [5, 80]. В [20] приведены результаты расчета характеристик ПАВ для

ориентаций подложки, соответствующих $\varphi = 0$ и различным значениям θ и ψ ; в качестве оптимальной предлагается ориентация подложки ($0, 76^\circ, 90^\circ$) для которой характерны значения ТКЗ и КЭМС, близкие к максимальным, а значение γ близко к оптимальной величине. В данной диссертации впервые проведен анализ результатов расчета параметров ПАВ для всевозможных ориентаций подложки из ниобата лития применительно к их использованию в качестве подложки для устройства на ПАВ, служащего чувствительным элементом датчика температуры.

На рисунке 33 приведены линии уровня зависимости ТКЗ от углов θ и ψ при двух фиксированных значениях угла φ : 0 и 30° . Аналогичные графики для $\varphi = 10^\circ$ и $\varphi = 20^\circ$, а также линии уровня зависимостей скорости ПАВ V , K^2 и PFA от θ и ψ при четырех фиксированных значениях φ ($0, 10^\circ, 20^\circ$ и 30°) приведены в приложении (рис. 68 – 71).

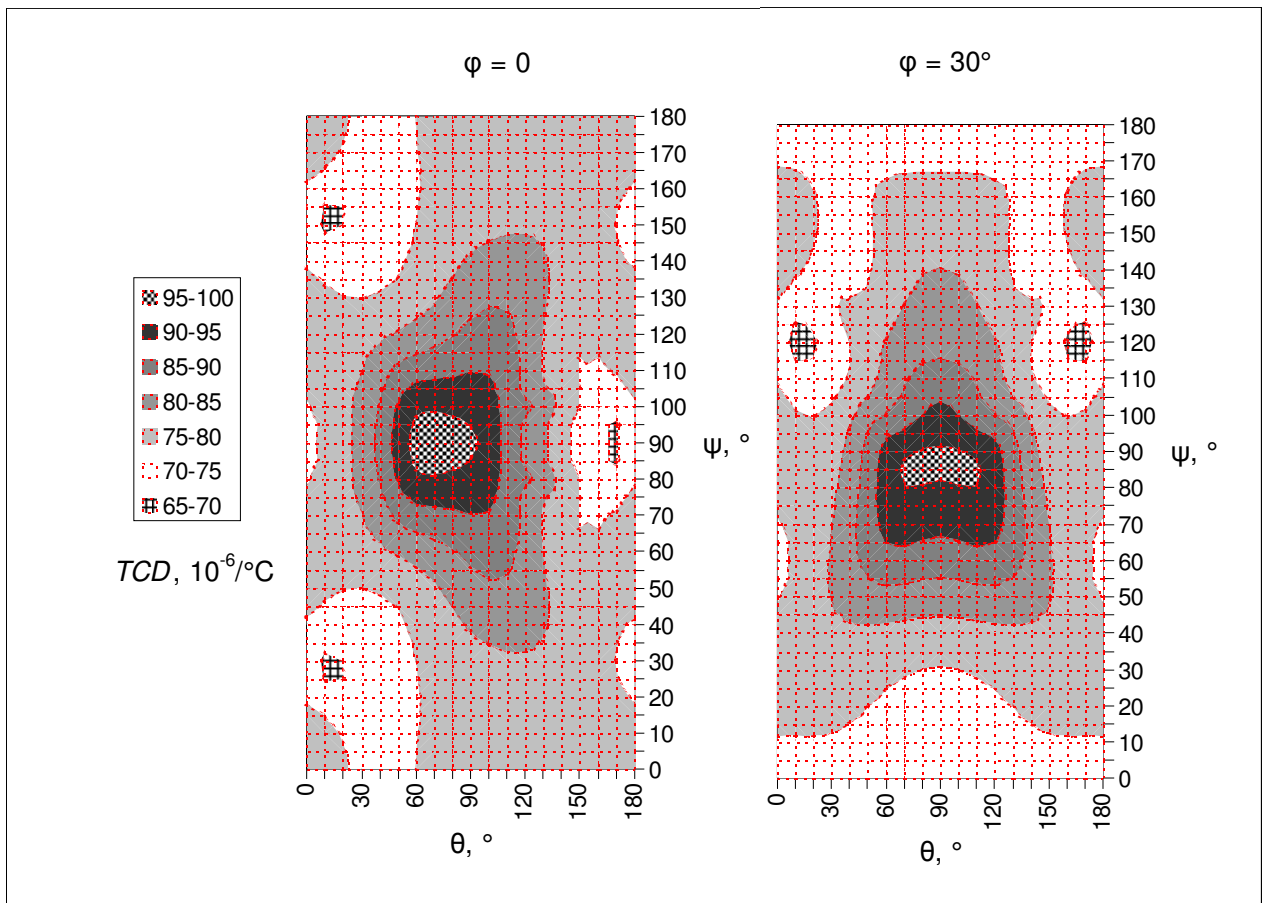


Рис. 33. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (слева) и $\varphi = 30^\circ$ (справа)

На рисунке 34 приведен график зависимости ТКЗ ПВР от угла θ . Графики зависимости V и K^2 от θ приведены в приложении (рисунки 72, 73). В случае ниобата лития скорость ПВР превышает скорость горизонтально-поперечной ОАВ на подложках, ориентации которых

соответствуют значениям угла θ , находящимся в диапазоне от 100° до 177° . На рисунке границы данной области отмечены вертикальными пунктирными линиями. Горизонтальные пунктирные линии показывают границы диапазона, в котором находятся значения TCD ПАВ с наименьшей скоростью. Как видно на рисунке, в случае ниобата лития ПВР со скоростями, превышающими скорость горизонтально-поперечной ОАВ, наиболее интересны для получения минимальных значений TCD . Максимальное значение TCD достигается у ПВР, имеющую скорость ниже скорости горизонтально-поперечной ОАВ; характеристики ПВР с максимальным TCD уже получены при расчете ПАВ с наименьшей скоростью.

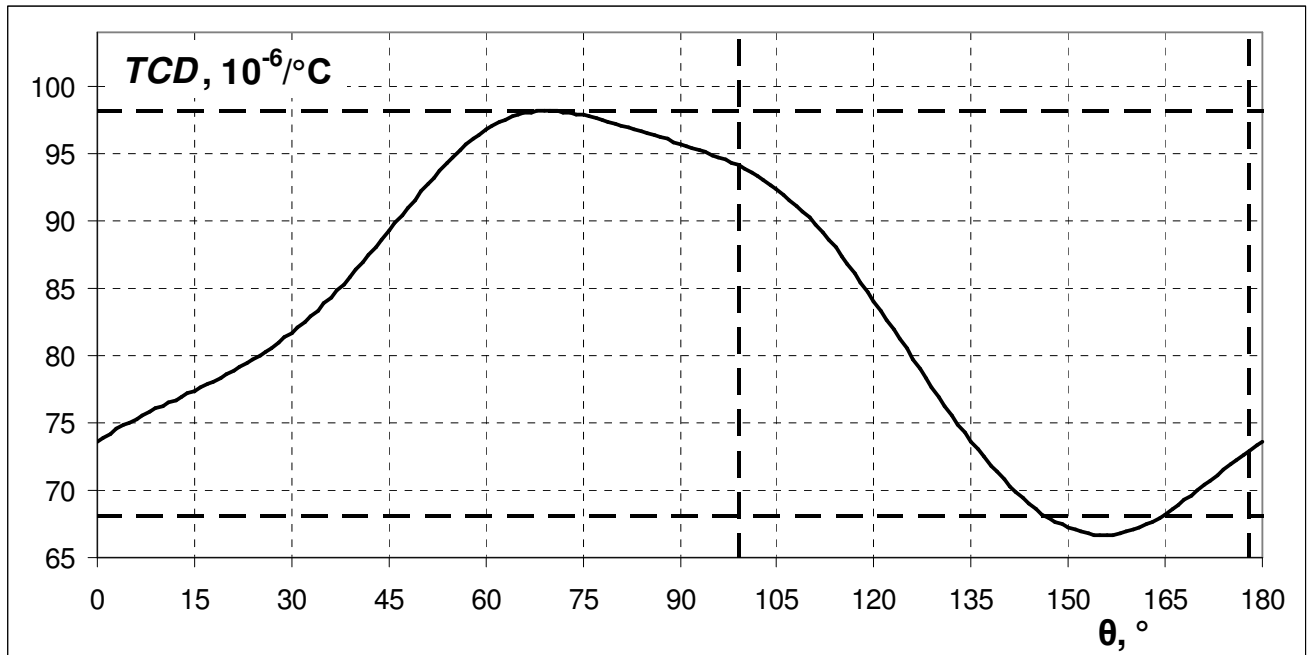


Рис. 34. Зависимость ТКЗ TCD ПВР на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ

3.6.2. Области ориентации подложек из ниобата лития с благоприятным сочетанием значений ТКЗ и КЭМС

Максимальный ТКЗ согласно расчету имеет величину $98 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и достигается при распространении ПАВ перпендикулярно к оси X на $-20^\circ Y$ -срезе (углы Эйлера $(0, 70^\circ, 90^\circ)$). Данной ориентации подложки соответствует $K^2 = 4,6\%$, $PFA = 0$. Значение K^2 близко к значению локального максимума и немного меньше глобального максимума для невытекающих волн. ПАВ, распространяющаяся на $Y-Z$ -срезе (углы Эйлера $(0, 90^\circ, 90^\circ)$), имеет незначительно меньший TCD (отличается на $2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) и немного меньший K^2 .

Минимальное значение $TCD = 67 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и достигается при распространении ПАВ перпендикулярно к оси X на $66^\circ Y$ -срезе (углы Эйлера $(0, 156^\circ, 90^\circ)$). Данной ориентации

подложки соответствует $K^2 = 1,7\%$, $PFA = 0$. Выбирая ориентацию подложки с большим значением θ , можно получить большее значение K^2 при немного меньшей абсолютной величине TCD (например, при $\theta = 160^\circ$ значение TCD отличается от минимального на $0,25 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, а K^2 достигает значения $2,1\%$); при $\theta = 170^\circ$ существует локальный максимум $K^2 = 2,6\%$, при этом $TCD = 70 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Упомянутые сейчас ПАВ отличаются тем, что их скорость превышает скорость одной из ОАВ. Они являются невытекающими только при распространении в направлении, строго перпендикулярном к оси X ; при некотором отклонении ψ от 90° ПВР переходит в вытекающую ПАВ. Вытекание энергии в глубину подложки, связанное с этим обстоятельством, также может присутствовать за счет конечной апертуры ВШП и ОР. Это является дополнительным фактором, обуславливающим интерес к альтернативным вариантам подложек с низкими значениями TCD .

Локальный минимум TCD также существует в области ориентаций подложки, соответствующих различным значениям φ , $0 < \theta < 30^\circ$, $140^\circ - \varphi < \psi < 160^\circ - \varphi$. Минимальное значение TCD в этой области отличается от минимального значения TCD ПВР не более чем на $3 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Наименьшим значениям TCD (не превышающим $71 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) в этой области соответствуют значения $K^2 < 1,5\%$. Другой локальный минимум $TCD = 71 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ находится вблизи глобального максимума $K^2 = 5,5\%$, который достигается при распространении ПАВ вдоль оси X на $128^\circ Y$ -срезе (углы Эйлера $(0, 38^\circ, 0)$).

3.6.3. Срезы ниобата лития для использования единой подложки для пары резонаторов

Максимальное значение Δ_{\max} согласно расчету составляет около $24 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и достигается в области ориентаций срезов, соответствующих различным значениям φ , $60^\circ < \theta < 90^\circ$. Значения ψ_{\max} находятся в диапазоне от 75° до 95° ; ПАВ, распространяющимся в этих направлениях, соответствуют $TCD > 95 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и K^2 около 4% . Значения ψ_{\min} находятся в диапазоне от 0 до 25° ; ПАВ, распространяющимся в этих направлениях, соответствуют $TCD < 75 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и $2\% < K^2 < 3\%$.

В данной области находятся X -срез и Y -срез (их преимущество состоит в том, что подложки из них производятся массово, а не только по специальному заказу). Близкое к максимально возможному значение $\Delta_{\max} = 23 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ можно получить при использовании X -среза. В этом случае $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\psi_{\max} = 88^\circ$ (при этом $TCD = 96 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $K^2 = 4,4\%$, $PFA = 3^\circ$), $\psi_{\min} = 12^\circ$ (при этом $TCD = 73 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $K^2 = 1,9\%$, $PFA = -6^\circ$). При использовании Y -среза можно получить $\Delta_{\max} = 20 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (примерно на 20% ниже максимально возможного значения)

в сочетании с нулевыми значениями PFA . В этом случае $\varphi = 0$, $\theta = 90^\circ$, $\psi_{\max} = 90^\circ$ (ПАВ распространяется вдоль оси Z с $TCD = 96 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и $K^2 = 4.2\%$), $\psi_{\min} = 0$ (ПАВ распространяется вдоль оси X с $TCD = 76 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и $K^2 = 0.74\%$).

3.6.4. Зависимость максимального, минимального ТКЗ и их разницы от требуемого значения КЭМС на подложках из ниобата лития

На рисунке 35 приведена зависимость расчетных значений TC_{\max} и TC_{\min} от K_{\min}^2 . Отдельно рассмотрены ПАВ с наименьшей скоростью и ПВР с низкими значениями TCD . При $K_{\min}^2 < 4.7\%$ TC_{\max} соответствует глобальному максимуму TCD и достигается на подложке с ориентацией $(0, 70^\circ, 90^\circ)$. При больших значениях K_{\min}^2 ориентация подложки с TC_{\max} приближается к ориентации $(0, 38^\circ, 0)$, на которой распространяется ПАВ с максимальным $K^2 = 5.5\%$.

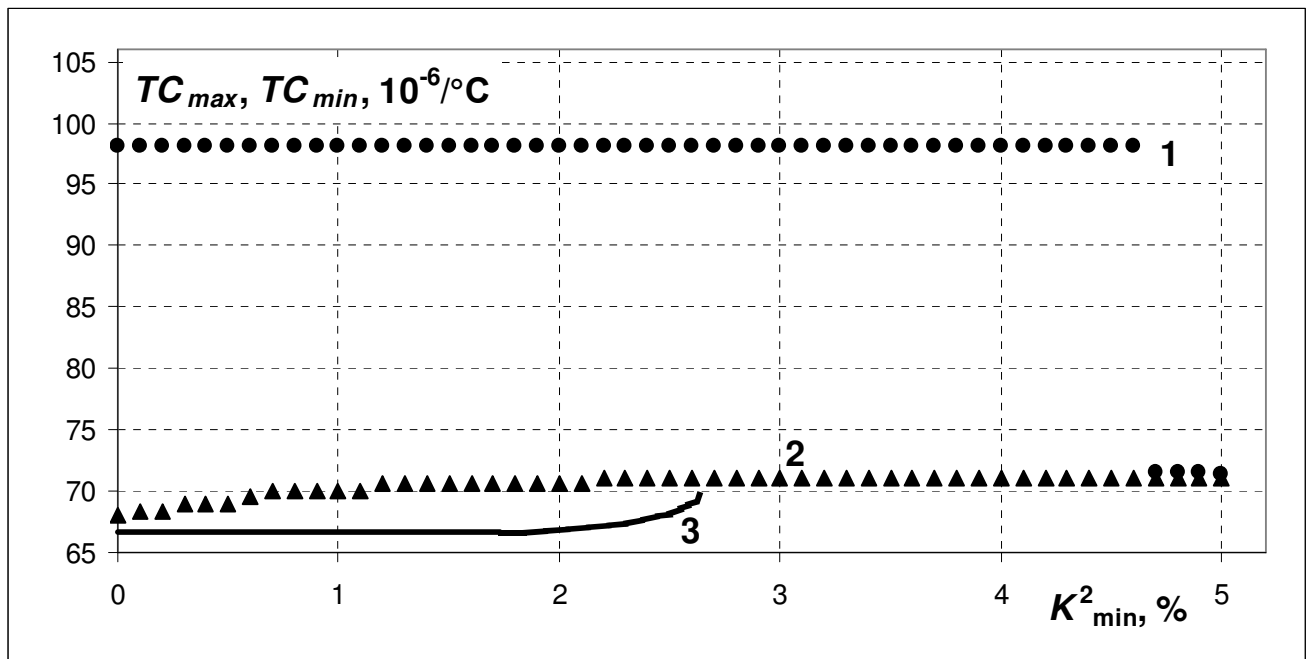


Рис. 35. Зависимость расчетных значений максимального ТКЗ TC_{\max} (1) и минимального ТКЗ TC_{\min} для ПАВ с наименьшей скоростью (2) и для ПВР (3) на ниобате лития от требуемого значения КЭМС K_{\min}^2

Для получения минимальных значений ТКЗ вариант с использованием ПВР является предпочтительным при $K_{\min}^2 < 2.7\%$. Если $K_{\min}^2 < 1.7\%$, то TC_{\min} достигается на срезе с

ориентацией $(0, 156^\circ, 90^\circ)$, при изменении K_{\min}^2 от 1,7% до 2,7% ориентация среза с TC_{\min} постепенно приближается к ориентации $(0, 170^\circ, 90^\circ)$.

В случае использования только ПАВ с наименьшей скоростью при $K_{\min}^2 < 1,2\%$ ориентация подложки с TC_{\min} находится в области ориентаций, соответствующих различным значениям φ , $0^\circ < \theta < 40^\circ$, $145^\circ - \varphi < \psi < 155^\circ - \varphi$. При больших значениях K_{\min}^2 ориентация подложки с TC_{\min} приближается к ориентации $(0, 38^\circ, 0)$ с максимальным $K^2 = 5,5\%$ и $TCD = 71 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

На рисунке 36 приведена зависимость Δ_{\max} от K_{\min}^2 . Δ_{\max} при $K_{\min}^2 < 2,7\%$ достигается на срезах из области ориентации, соответствующей $\varphi < 25^\circ$ и $50^\circ < \theta < 80^\circ$; направления распространения ПАВ соответствуют диапазонам $80^\circ < \psi_{\max} < 95^\circ$ и $5^\circ < \psi_{\min} < 30^\circ$. При K_{\min}^2 , изменяющемся от 2,7% до 4,2%, Δ_{\max} достигаются на X-срезе, при этом $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\psi_{\max} = 88^\circ$, а ψ_{\min} с ростом K_{\min}^2 изменяется от 35° до 80° (направление распространения ПАВ с минимальным TCD приближается к области высоких TCD). При больших значениях K_{\min}^2 Δ_{\max} достигаются на срезах, близких к срезу с максимальным K^2 ; при этом и ψ_{\max} , и ψ_{\min} приближаются к значению, соответствующему направлению распространения ПАВ с максимальным K^2 .

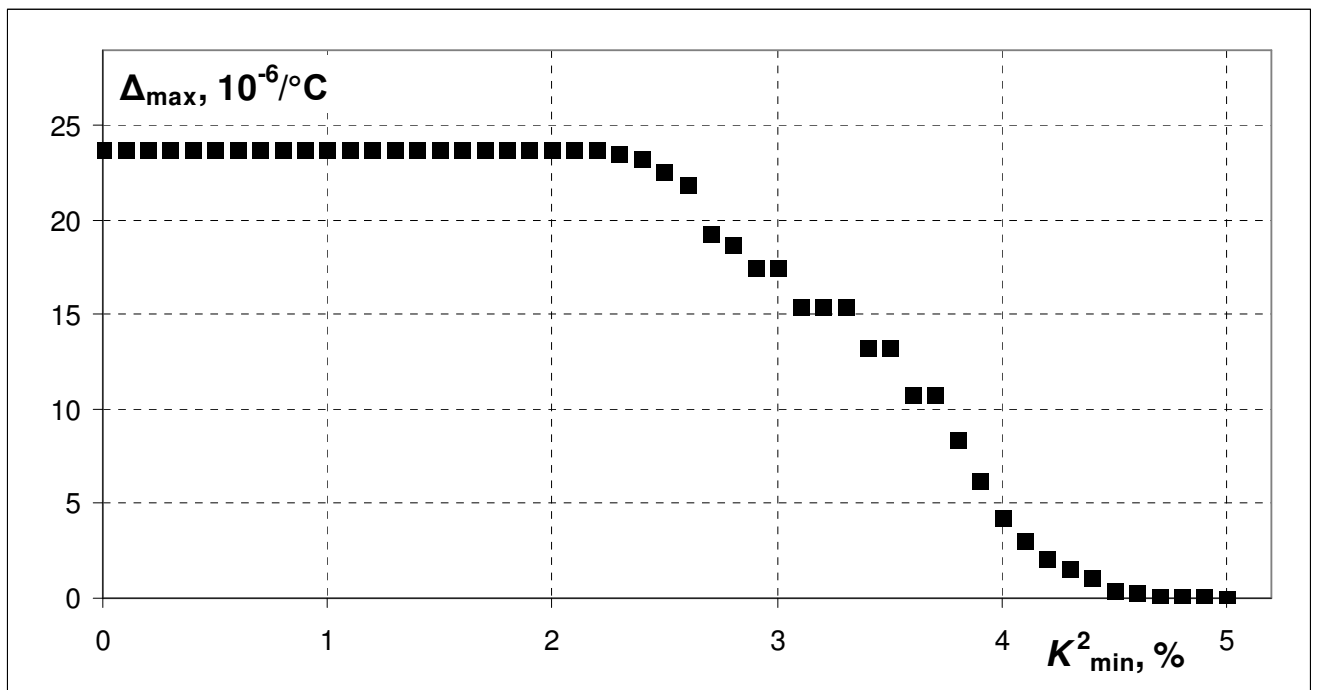


Рис. 36. Зависимость максимальной разницы ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} на ниобате лития от требуемого значения КЭМС K_{\min}^2

Подложки из ниобата лития позволяют получить Δ_{TCF} до $24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Максимальный достижимый Δ_{TCF} ниже, чем на подложках из остальных рассмотренных здесь материалов. Но при значениях K_{\min}^2 около 0,45% и выше подложки из ниобата лития позволяют получить большие значения Δ_{TCF} , чем подложки из танталата лития. При значениях K_{\min}^2 около 2% и выше (не достижимых на подложках из танталата лития) на подложках из ниобата лития возможно достижение значений Δ_{TCF} до $24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Использование различных подложек из ниобата лития для пары резонаторов позволяет получить разницу ТКЧ до $31 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Более подробное обсуждение возможностей использования различных подложек для пары резонаторов будет проведено при сравнительном анализе всех рассмотренных здесь материалов.

3.7. Сравнительный анализ различных материалов подложки

3.7.1. Зависимость максимальной разницы ТКЗ пары ПАВ на единой подложке от требуемого значения КЭМС

На рисунке 37 приведены графики зависимости Δ_{\max} от K_{\min}^2 для всех рассмотренных материалов. Для кварца приведены точки, соответствующие основному и альтернативному варианту. Шкала K_{\min}^2 отображается в логарифмическом масштабе для более удобного сравнения графиков, у которых пределы изменения K_{\min}^2 различаются почти на порядок и более. На вставке более подробно (с использованием линейного масштаба K_{\min}^2) показана область пересечения графиков.

Кварц является наилучшим среди рассмотренных материалов для изготовления пары резонаторов на единой подложке в случае, когда приемлемым уровнем K^2 считается 0,1% или менее. При $Q = 10000$ (что для резонаторов на ПАВ на подложках из кварца для 100..500 МГц, как правило, является достижимым уровнем при использовании соответствующей конструкции резонаторов и технологии их производства) и $K^2 = 0,1\%$ можно ожидать достижения произведением $K_c Q$ значений не ниже 5. Учитывая уменьшение эффективного коэффициента связи \tilde{K}_c для пары параллельно подключенных резонаторов примерно вдвое по сравнению K_c одиночного резонатора, можно ожидать достижения произведением $\tilde{K}_c Q$ значений не ниже 2.

Это является вполне приемлемой величиной $\tilde{K}_c Q$ для получения высокой эффективности переизлучения датчиком энергии опрашивающего сигнала (при $\tilde{K}_c Q = 2$ значение η отличается от максимально возможного на 20%). То есть, $K^2 = 0,1\%$ можно считать уровнем КЭМС, достаточным для достижения высокой эффективности переизлучения энергии в большинстве случаев. Таким образом, подложки из кварца являются наилучшим выбором для изготовления пары резонаторов на ПАВ на единой подложке в большинстве случаев, когда требуется высокая чувствительность разности резонансных частот к температуре.

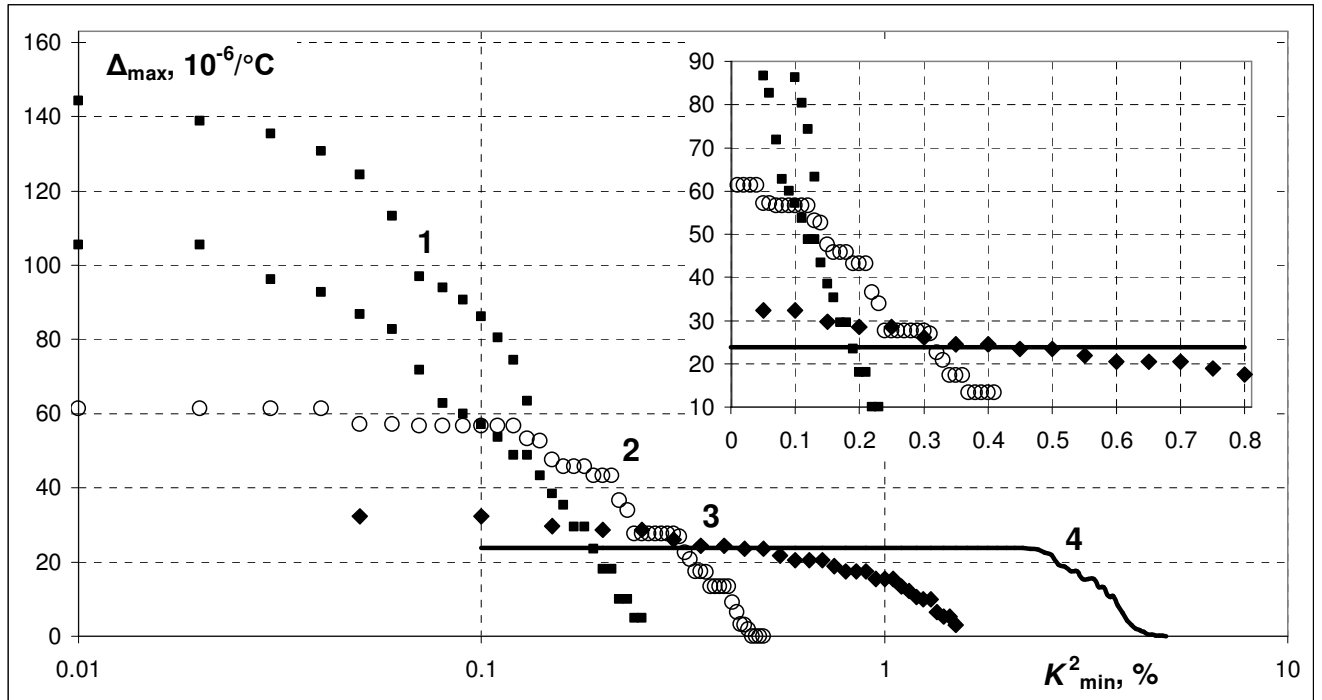


Рис. 37. Зависимость максимальной разности ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} для кварца (1), лангасита (2), танталата лития (3) и ниобата лития (4) от требуемого значения КЭМС K_{\min}^2

В некоторых случаях могут требоваться большие значения K^2 . В частности, это может требоваться при более высоких рабочих частотах (на которых достижение $Q = 10000$ становится затруднительным), при изменении в широком диапазоне значения R_A (в этом случае для получения высокого значения η при всех возможных значениях R_A требуется большее значения $K_c Q$), при параллельном включении более чем для двух резонаторов (в этом случае \tilde{K}_c существенно меньше, чем $0,5K_c$). Поэтому выбор подложки для получения $K^2 > 0,1\%$ также заслуживает внимания. Подложки из кварца конкурируют с подложками из лангасита при $0,1\% < K_{\min}^2 < 0,15\%$. Таким образом, подложки из кварца интересны для получения $45 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C} < \Delta_{TCF} < 145 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в сочетании с $K^2 < 0,15\%$. Подложки из лангасита интересны для получения 25

$10^{-6}/^{\circ}\text{C} < \Delta_{TCF} < 55 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ в сочетании с $0,1\% < K^2 < 0,3\%$. Подложки из танталата лития интересны для получения $23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C} < \Delta_{TCF} < 30 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ в сочетании с $0,25\% < K^2 < 0,5\%$. Для получения $K^2 > 0,35\%$ в сочетании с $\Delta_{TCF} < 24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ представляют интерес подложки из ниобата лития. В случаях, когда меньшее требуемое значение Δ_{TCF} сочетается с требуемым значением K^2 из вышеуказанных диапазонов или меньшее значение K^2 сочетается с требуемым значением Δ_{TCF} вышеуказанных диапазонов, выбор материалов расширяется (так, для получения $K^2 < 0,17\%$ в сочетании с $\Delta_{TCF} < 23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ может быть использован любой из рассмотренных материалов). В таких случаях при выборе подложек имеет смысл обратить внимание на их прочие характеристики.

3.7.2. Зависимость максимальной разницы ТКЗ пары ПАВ на разных подложках от требуемого значения КЭМС

При использовании для пары резонаторов двух различных подложек практически не имеет значения, изготовлены ли они из двух разных срезов одного материала или из различных материалов. Поэтому имеет смысл рассмотреть пары подложек из любых комбинаций всех рассматриваемых материалов. В качестве подложки с высоким положительным значением TCD при значениях K_{\min}^2 не превышающих $4,6\%$ наилучшим вариантом для достижения максимальной разницы TCD является подложка из ниобата лития с ориентацией $(0, 70^{\circ}, 90^{\circ})$. На ней достигается значение TCD среди всех невытекающих ПАВ для всех возможных ориентаций подложки из всех рассмотренных материалов. Большие значения K^2 достигаются опять же на подложках из ниобата лития. В этом случае их ориентация находится вблизи ориентации $(0, 38^{\circ}, 90^{\circ})$. Поэтому под разностью $(TC_{\max} - TC_{\min})$, соответствующей некоторому материалу, будем подразумевать разность TC_{\max} ниобата лития и TC_{\min} этого материала. Графики зависимости этой величины от K_{\min}^2 для всех рассмотренных материалов приведены на рис. 38. Для кварца отдельно рассмотрены ПАВ с наименьшей скоростью и ВГБ на $70^{\circ}Y$ -срезе. На участке графика для ВГБ, соответствующего значениям K_{\min}^2 , достижимым при толщине эквивалентного слоя алюминия $2,5\%$ от λ или менее, нанесены точки. Участок графика, соответствующий большим значениям K_{\min}^2 (достижимых при больших значениях $\frac{h}{\lambda}$), проведены линией без точек. Для ниобата лития рассмотрены ПАВ с наименьшей скоростью (использование ПВР с большей скоростью позволяет получить разницу ТКЗ отличающуюся не

более чем на $5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Для сравнения приведен график $\Delta_{\max}(K_{\min}^2)$, на котором каждому значению K_{\min}^2 соответствует наибольшее из значений Δ_{\max} для рассмотренных материалов. Шкала K_{\min}^2 отображается в логарифмическом масштабе для более удобного сравнения графиков, у которых пределы изменения K_{\min}^2 различаются почти на порядок и более.

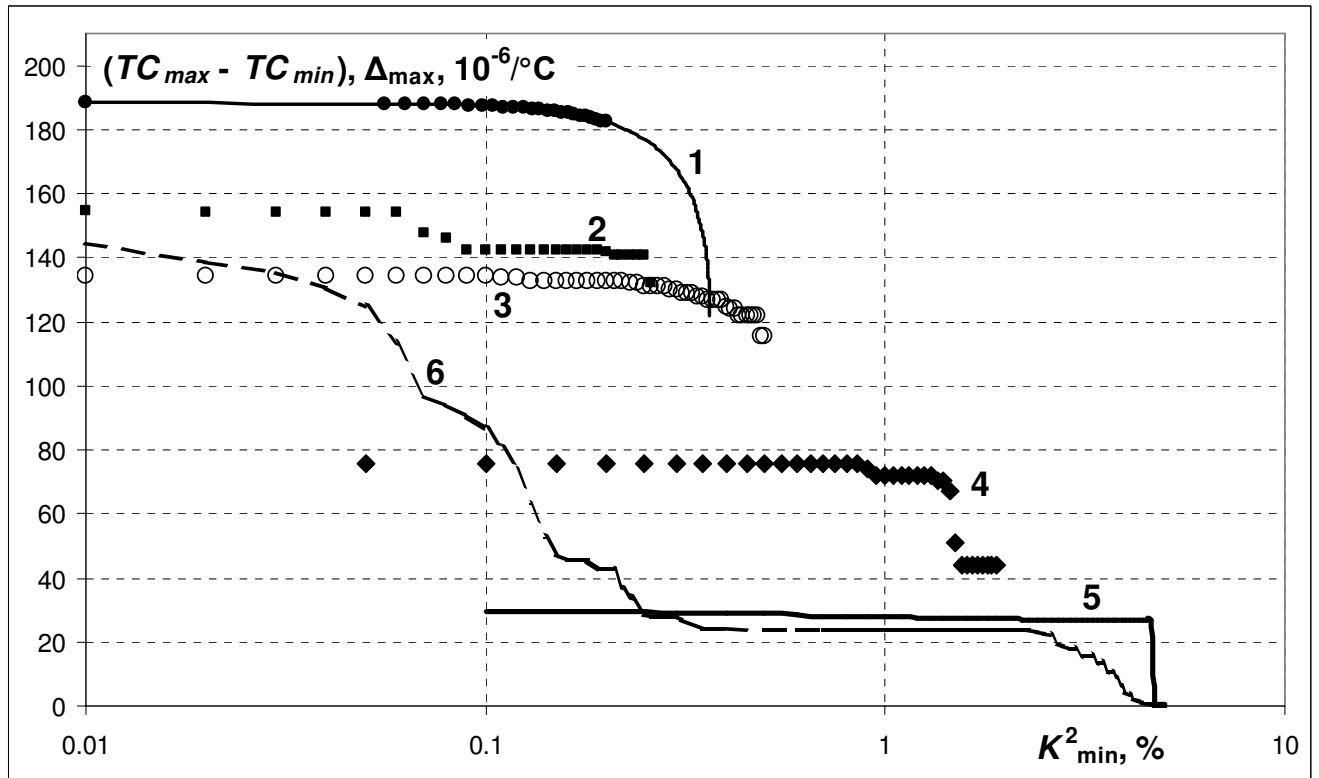


Рис. 38. Зависимость разности максимального ТКЗ TC_{\max} и минимального ТКЗ TC_{\min} для ВГБ (1) и для ПАВ с наименьшей скоростью (2) на кварце, для лангасита (3), для танталата лития (4) и для ниобата лития (5), зависимость максимальной разности ТКЧ пары резонаторов, расположенных на одной подложке, Δ_{\max} (6) от требуемого значения КЭМС K_{\min}^2

Максимальную разность ТКЗ, можно получить при использовании ВГБ на 70°Y -срезу кварца (ориентация подложки $(0, 160^{\circ}, 90^{\circ})$). Согласно оценке, сделанной с использованием расчета характеристик ВГБ, распространяющейся вдоль поверхности подложки, покрытой слоем алюминия, при отсутствии требований к КЭМС разность ТКЗ достигает $188 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, а при $K_{\min}^2 = 0,1\%$ отличается от максимальной не более чем на $1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. При $\frac{h}{\lambda} = 2,5\%$ значение K^2 достигает $0,2\%$, а разность ТКЗ снижается до $182 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. При использовании только ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца максимальная достижимая разность ТКЗ меньше на $30..40 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Использование подложек из лангасита позволяет достичь еще меньших значений разности ТКЗ, чем использование ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца вплоть до значения $K_{\min}^2 = 0,26$ (т.е. значения K^2 , максимального возможного на подложках из кварца при распространении ПАВ вдоль свободной поверхности). При больших значениях K_{\min}^2 среди трех материалов, позволяющих их достичь, лангасит является наилучшим материалом подложки для достижения максимальной разницы TCD вплоть до значения $K_{\min}^2 = 0,52\%$ (т.е. значения K^2 , максимального возможного на подложках из лангасита при распространении ПАВ вдоль свободной поверхности). Значения максимальной разности ТКЗ, достигаемые при использовании подложек из лангасита в данном диапазоне значений K_{\min}^2 , находятся в диапазоне от $115 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $135 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

При $K_{\min}^2 > 0,26$ также возможно достижение более высоких значений разности ТКЗ за счет использования ВГБ на кварце с более толстыми электродами. Согласно расчету характеристик K^2 ВГБ, распространяющейся на $70^{\circ}Y$ -срезе кварца вдоль поверхности, покрытой слоем алюминия, может достигать $0,36\%$ при $\frac{h}{\lambda}$ около 10% . Разность ТКЗ для ВГБ на кварце монотонно убывает с ростом K_{\min}^2 , и при $K_{\min}^2 \approx 0,36\%$ достигает разности ТКЗ для лангасита и становится немного ниже ее. Надо заметить, что характеристики ПАВ в структуре с электродами при таких значениях толщины могут существенно отличаться от характеристик ПАВ в структуре со сплошным слоем, кроме того, ориентация среза, на котором достигается оптимум, может заметно отличаться от ориентации, оптимальной при тонких электродах. Таким образом, данный результат расчета только демонстрирует принципиальную возможность получения разности ТКЗ существенно большей, чем достигается в случае использования лангасита, при K_{\min}^2 превышающем $0,26\%$.

Использование подложек из танталата лития позволяет достичь еще меньших значений разности ТКЗ, чем использование подложек из лангасита, и позволяет получить еще большие значения K^2 . Танталат лития является наилучшим материалом подложки для достижения максимальной разницы TCD вплоть до значений K_{\min}^2 от $0,52\%$ (т.е. значения K^2 , максимального возможного на подложках из лангасита при распространении ПАВ вдоль свободной поверхности) до 2% (т.е. значения K^2 , максимального возможного на подложках из танталата лития). Значения максимальной разности ТКЗ, достигаемые при использовании подложек из танталата лития в данном диапазоне значений K_{\min}^2 , находятся в диапазоне от $43 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ до $75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Большие значения разности ТКЗ в данном диапазоне значений K_{\min}^2 потенциально могут быть получены при использовании ВГБ на лангасите с электродами из

материалов с высокой плотностью (например, при наличии на поверхности подложки слоя золота, K^2 на имеющем минимальный ТКЗ $67^\circ Y$ -срезе может достигать 0,9%).

Значения разности ТКЗ от $75 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $115 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в сочетании с $K_{\min}^2 = 0,52\%$ можно получить при использовании подложки из лангасита с максимальным значением K^2 в сочетании с подложками из ниобата лития (со значениями ТКЗ меньшими, чем максимальное значение) или в сочетании с подложками из танталата лития (если требуется разность ТКЗ менее $85 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$).

Наибольшие значения K^2 и наименьшие значения разности ТКЗ достигаются при использовании обеих подложек из ниобата лития. При $K_{\min}^2 > 2\%$ (максимальное возможное значение K^2 на подложках из танталата лития) значения максимальной разности ТКЗ, достигаемые при использовании подложек из ниобата лития, находятся в диапазоне от 0 до $28 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (при использовании ПВР со скоростью, превышающей скорость одной из ОАВ, они могут достигать $31 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). Значения разности ТКЗ от $28 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $43 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в сочетании с $K_{\min}^2 = 2\%$ можно получить при использовании подложки из танталата лития с максимальным K^2 в сочетании с подложками из ниобата лития (со значениями ТКЗ меньшими, чем максимальное значение).

Комбинация подложки из кварца с ориентацией ($0, 160^\circ, 90^\circ$) и подложки из ниобата лития с ориентацией ($0, 70^\circ, 90^\circ$) позволяет получить разность ТКЧ пары резонаторов, превышающую разность ТКЧ пары резонаторов на единой подложке на $45..100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (в 1,3..2,2 раза) при $K_{\min}^2 < 0,1\%$. При использовании на подложках из кварца только ПАВ с наименьшей скоростью максимальная разность ТКЧ в этом диапазоне K_{\min}^2 превышает максимальную разность ТКЧ для единой подложки на $10..60 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (в 1,07..1,7 раза).

При больших значениях K_{\min}^2 разница между разностями ТКЧ, достижимыми на разных подложках и на одной подложке, увеличивается и достигает $140 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в случае использования ВГБ и $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при использовании ПАВ с наименьшей скоростью (отношение достигает 6 раз и 5 раз, соответственно). Для подложек из лангасита (в соответствующем диапазоне K_{\min}^2) она составляет $90..100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (значения отличаются в 4,5..5 раз). При использовании подложек из танталата лития (в соответствующем диапазоне K_{\min}^2) она составляет $20..50 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (значения отличаются в 1,8..3,2 раза). При $K_{\min}^2 > 2\%$ разница между разностями ТКЧ, достижимыми на разных подложках из ниобата лития и на одной подложке из него, может достигать $27 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в случаях, когда Δ_{\max} приближается к нулю.

3.8. Выводы по главе 3

В данной главе проведено теоретическое исследование влияния ориентации подложки на параметры резонатора на ПАВ, наиболее важные для использования в беспроводном датчике температуры. Проведен анализ взаимосвязи характеристик ПАВ и параметров резонаторов. Рассмотрены характеристики ПАВ на четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических кристаллах: кварц, лангасит, танталат лития и ниобат лития. Для перечисленных материалов проведен расчет характеристик всех невытекающих ПАВ: ПАВ с наименьшей скоростью для всех возможных ориентаций подложки, а также ВГБ и ПВР, для всех ориентаций подложки, поддерживающих их распространение. Анализ результатов расчета позволил составить рекомендации по выбору подложки для резонаторов на ПАВ, используемых в качестве чувствительного элемента беспроводного датчика температуры. Описаны зависимости максимального значения ТКЗ, минимального значения ТКЗ и максимальной разности ТКЗ ПАВ, распространяющихся в разных направлениях на одном срезе, от минимального требуемого значения КЭМС для рассмотренных материалов подложки. Указаны диапазоны ориентаций подложки, которые требуются для достижения указанных экстремальных величин ТКЗ или разности ТКЗ при том или ином требуемом значении КЭМС.

1. Установлено, что для достижения максимальной разности ТКЧ пары резонаторов на единой подложке наиболее подходят подложки из кварца. Среди них наибольшие значения Δ_{\max} позволяют получить подложки, ориентация которых находится в диапазоне от $60^\circ Y$ -среза до $85^\circ Y$ -среза. На данных срезах распространяется ВГБ с большим по модулю отрицательным ТКЗ, достигающим $-90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (по расчету минимум ТКЗ ВГБ достигается на $70^\circ Y$ -срезе). При изменении K_{\min}^2 от 0 до 0,13% значения Δ_{\max} изменяются от $150 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $63 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Выбор ориентации подложки и направления распространения ПАВ с положительным ТКЗ позволяет найти компромисс между эффективностью переизлучения и разностью ТКЧ резонаторов. При $K_{\min}^2 < 0,07\%$ направление распространения ПАВ с положительным ТКЗ мало отличается от направления распространения ВГБ, что позволяет разместить резонаторы почти параллельно и минимизировать занимаемую ими площадь подложки. Полученные выводы приведены в [A15, A16, A18]; применение $70^\circ Y$ -среза и близких к нему срезов кварца в качестве подложки для резонатора на ПАВ используемого как чувствительный элемент датчика температуры защищено патентом [A2].

2. Значение K^2 около 0,1% позволяет достигать максимальной или близкой к ней эффективности переизлучения энергии опрашивающего сигнала для большинства практических применений. Учитывая практическую возможность случаев, в которых для достижения высокой эффективности переизлучения энергии датчиком требуются значения K^2 значительно большие 0,1%, предложены также подложки, позволяющие получать максимальную разность ТКЧ при различных значениях K_{\min}^2 . Каждый из рассмотренных материалов представляет интерес в некотором диапазоне K_{\min}^2 . Области ориентации подложки для получения максимальной величины Δ_{TCF} при заданном K_{\min}^2 или максимального K_{\min}^2 при заданном значении Δ_{TCF} приведены в табл. 2.
3. В случае изготовления пары резонаторов на двух разных подложках наибольшая разность ТКЧ (до $188 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) достигается при использовании ВГБ на 70°Y -срезах кварца в сочетании с подложкой из ниобата лития с ориентацией (0, 70° , 90°), на которой ТКЗ ПАВ достигает $98 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. При одних и тех же значениях K_{\min}^2 разность ТКЧ такой пары резонаторов превышает максимальную разность ТКЧ пары резонаторов на одной подложке в 1,3..2,2 раза (на $45..100 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Комбинации материалов подложек для получения максимальной величины Δ_{TCF} при заданном K_{\min}^2 или максимального K_{\min}^2 при заданном значении Δ_{TCF} приведены в табл. 3.

Таблица 2. Рекомендуемые области ориентации подложки для изготовления пары резонаторов на ПАВ на единой подложке

Материал	Область углов Эйлера			$\Delta_{TCF}, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$K_{\min}^2, \%$
	φ	θ	ψ		
кварц	0	$160..175^{\circ}$	90°	95..150	0..0,07
			$75..90^{\circ}$		
	0	$150..160^{\circ}$	90°	63..95	0,07..0,13
			$0..35^{\circ}$		
лангасит	$0..30^{\circ}$	$20..80^{\circ}$	$(80..100^{\circ}) - \varphi$	40..57	0,1..0,23
			$(135..155^{\circ}) - \varphi$		
	$0..30^{\circ}$	$140..170^{\circ}$	$(20..35^{\circ}) + \varphi$	25..40	0,23..0,32
			$-10..10^{\circ}$		
танталат лития	$15..30^{\circ}$	$75..90^{\circ}$	$135..175^{\circ}$	23..28	0,25.. 0,5
			$65..85^{\circ}$		
ниобат лития	$0..25^{\circ}$	$50..80^{\circ}$	$80..95^{\circ}$	20..24	0,45..2,7
			$5..30^{\circ}$		
	30°	90°	$85..90^{\circ}$	< 20	2,7..4,2
			$35..80^{\circ}$		

Таблица 3. Рекомендуемые комбинации материалов подложки для изготовления пары резонаторов на ПАВ на единой подложке

Материал(ы) подложек	$TC_{\max} - TC_{\min}, 10^{-6}/^{\circ}C$	$K_{\min}^2, \%$
кварц / ниобат лития	130..188	0..0,26
лангасит / ниобат лития	85..135	0,26..0,52
лангасит / танталат лития	75..85	0,52
танталат лития / ниобат лития	28..75	0,52..2
ниобат лития	< 28	2..5,5

Полученные результаты требуют проверки путем сравнения с экспериментальными данными. Поскольку по итогам анализа результатов расчета установлено, что наибольший интерес для данного применения представляют подложки из кварца, в рамках экспериментальной проверки результатов расчета было решено сконцентрировать внимание именно на них, и в первую очередь на впервые предложенном здесь $70^{\circ}Y$ -срезе. Помимо проверки достоверности результатов расчета путем сравнения рассчитанных характеристик ПАВ с измеренными, эксперимент по изготовлению резонаторов на новых подложках представляет интерес для подтверждения возможности изготовления на них резонаторов с приемлемыми характеристиками. В следующей главе описаны предложенные конструкции резонаторов на нескольких подложках из кварца и результаты измерения их параметров, проведено сопоставление измеренных и расчетных характеристик, а также приведены результаты измерения параметров резонаторов на нескольких подложках из лангасита.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ НА ПАВ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ КВАРЦА И ЛАНГАСИТА

4.1. Ориентация подложек из кварца и конструкции резонаторов

Для проверки достоверности результатов расчета в целом и экспериментального подтверждения результатов, представляющих наибольший практический интерес, были спроектированы пары резонаторов на нескольких срезах кварца. Как показано в предыдущей главе, среди подложек из четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических кристаллов, именно подложки из кварца позволяют получить наибольшую разность ТКЧ пары резонаторов, изготовленных на единой подложке. Изготовление разработанных резонаторов на подложках с выбранной ориентацией и измерение их характеристик было проведено в АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург). Непосредственно автором диссертации проводилась обработка результатов измерений для определения параметров резонаторов и независимое измерение некоторых образцов для дополнительной проверки наиболее значимых результатов.

Были спроектированы резонаторы, предназначенные для изготовления на 8 различных срезах кварца. Во-первых, это резонатор, в котором используется ВГБ на $70^\circ Y$ -срезе (соответствующие углы Эйлера $(0, 160^\circ, 90^\circ)$), имеющая, согласно расчету, максимальный по абсолютной величине отрицательный ТКЗ среди ТКЗ всех невытекающих ПАВ на всех рассмотренных материалах. Это позволяет получить резонатор с максимальным положительным ТКЧ. Пару с ним на данном срезе составил резонатор со сравнительно высоким отрицательным ТКЧ, в котором используется ПАВ, распространяющаяся под углом 80° к оси X (углы Эйлера $(0, 160^\circ, 80^\circ)$), что позволяет получить значение Δ_{\max} близкое к максимальному среди значений Δ_{\max} , достигаемых на всевозможных подложках из всех рассмотренных материалов. Во-вторых, для экспериментальной проверки были выбраны три среза, позволяющие получить значения Δ_{\max} , приближающиеся к максимальному значению, получаемому при использовании ПАВ только с наименьшей скоростью. Это $78^\circ X$ -срез и опять же $70^\circ Y$ -срез (с иным направлением распространения ПАВ с отрицательным ТКЗ) из области срезов, которым соответствуют значения θ от 150° до 175° и различными значениями φ , а значения ψ_{\max} и ψ_{\min} находятся вблизи $(90^\circ + \varphi)$ и $(30^\circ + \varphi)$, соответственно. А также это $14^\circ X$ -срез из области срезов, на которых достигается локальный минимум Δ_{\max} , близких к X-срезу. В-третьих, для получения большего количества экспериментальных данных и более надежной проверки результатов расчета из имеющихся в наличии пластин кварца с различными

ориентациями, были выбраны три среза, позволяющие получить сравнительно большие значения Δ_{\max} . Это $32^\circ X$ -срез (близкий к области срезов, на которых достигается локальный минимум Δ_{\max}), $-40^\circ Y$ -срез и $-30^\circ Y$ -срез. В-четвертых, из наиболее доступных для быстрого приобретения срезов, были выбраны X -срез и Y -срез. Таким образом, всего было спроектировано 17 резонаторов: 3 для $70^\circ Y$ -среза (они образуют две различные пары резонаторов из двух разных резонаторов с положительным ТКЧ и одного, общего для двух пар, резонатора с отрицательным ТКЧ) и по 2 для остальных 7 срезов.

Резонаторы на ПАВ с рабочей частотой, находящейся в диапазоне от 900 МГц до 930 МГц, были разработаны для различных ориентаций подложки с использованием упоминавшейся в главе 2 программы для расчета характеристик устройств на ПАВ методом связанных волн мод. В качестве исходных данных для этой программы использовались расчетные СОМ-параметры, вычисленные с использованием результатов расчета характеристик ПАВ в периодической структуре, проводимых посредством модифицированной программы FEMSDA [39]. Для расчета характеристик ПАВ в подложке из кварца, на поверхности которой находится периодическая структура из алюминиевых электродов, использовались материальные константы кварца, приведенные в [90], и материальные константы алюминия, упомянутые в главе 3.

На рисунке 39 приведено схематичное изображение структуры резонатора на ПАВ, на которой показаны параметры конструкции резонатора: количество электродов в ОР n_R , шаг электродов (период) ОР d_R , количество электродов в ВШП n_{IDT} , шаг электродов (половина периода) ВШП $d_{IDT} = \frac{p_{IDT}}{2}$, зазор между ВШП и ОР d (зазор между ближайшим к ОР электродом ВШП и ближайшим к ВШП электродом ОР), апертура ВШП w и угол наклона резонатора относительно направления распространения ПАВ (определяемого по направлению вектора фазовой скорости), равный углу отклонения потока энергии PFA . В общем случае резонаторы на ПАВ могут иметь и более сложную структуру, здесь приведена структура именно таких резонаторов, которые использовались в данной работе.

Вследствие различия основных характеристик ПАВ (скорости распространения, КЭМС, коэффициента отражения ПАВ от электродов, угла отклонения потока энергии), распространяющихся в различных направлениях на разных срезах параметры конструкции резонаторов подбирались индивидуально для каждого резонатора на каждом срезе. Выбор параметров конструкции осуществлялся таким образом, чтобы получать максимальную добротность, значение проводимости на резонансной частоте в диапазоне от 20 мСм до 40 мСм и минимальный уровень побочных пиков вблизи основного резонанса. В таблице 4 приведены параметры конструкции 17 спроектированных резонаторов.

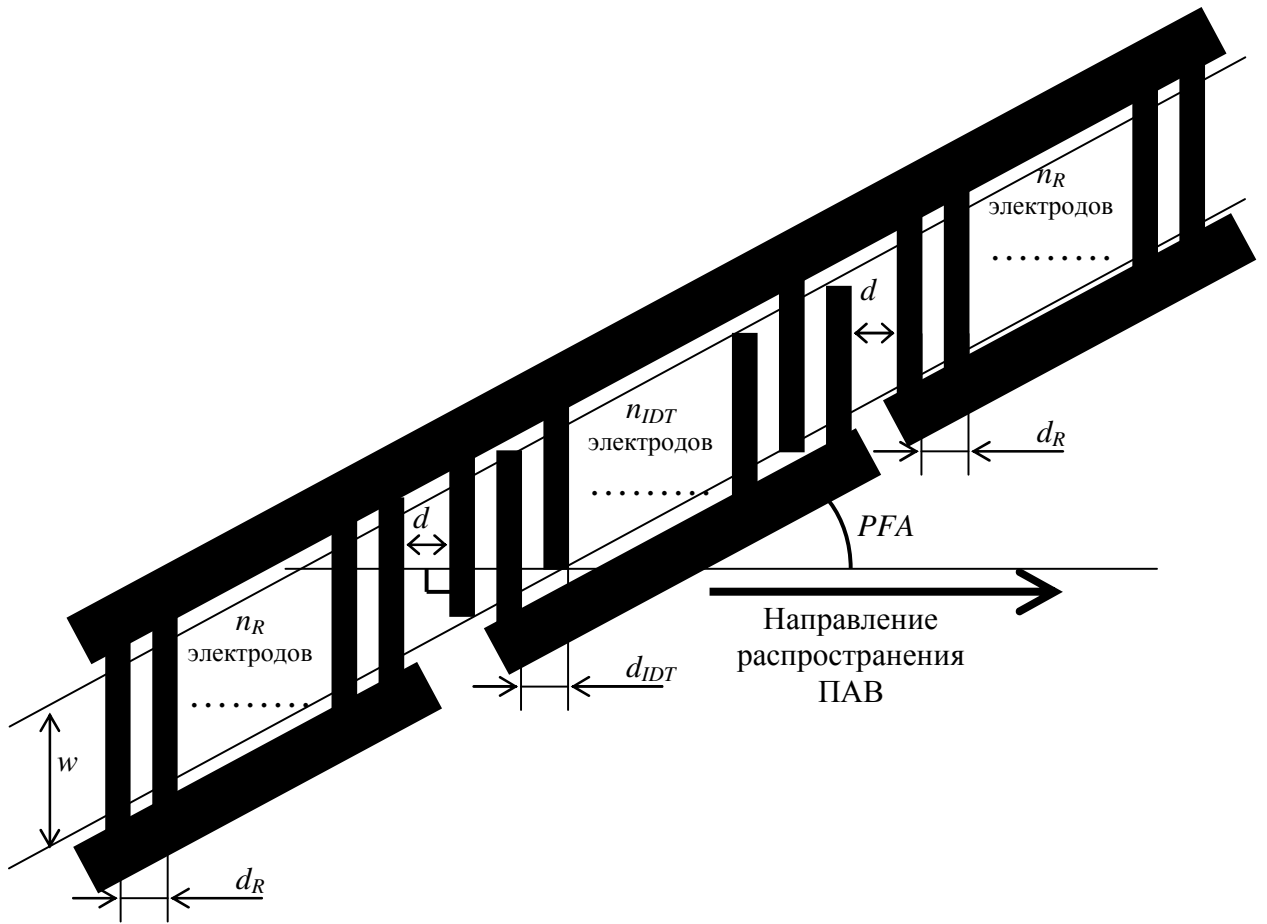


Рис. 39. Структура резонатора на ПАВ

Электроды всех резонаторов должны иметь коэффициент металлизации 50%, толщина электродов должна составлять 100 нм у всех резонаторов, кроме пары резонаторов для -40°Y -среза (на нем в обоих направлениях распространения коэффициент отражения ПАВ от электродов имеет достаточно большое значение при толщине электродов 70 нм). Во всех резонаторах использовались ОР, электроды которых короткозамкнуты между собой. В таблице 4 также приведены ожидаемые значения ТКЧ резонаторов (в данном случае они оцениваются как значения ТКЗ ПАВ, распространяющихся в структуре с эквивалентным слоем алюминия, взятые с противоположным знаком).

Все резонаторы, параметры которых приведены в табл. 4, были изготовлены на соответствующих срезах. Проведены измерения частотных характеристик всех изготовленных резонаторов и измерения зависимости их резонансной частоты от температуры в диапазоне от 20°C до 50°C (для некоторых резонаторов в более широком диапазоне температуры). Погрешность измерения ТКЧ обусловлена конечным разрешением измеренных частотных характеристик и погрешностью измерения температуры. Разброс измеренных значений ТКЧ разных образцов резонаторов одной и той же конструкции, который может быть обусловлен как погрешностью определения ТКЧ, так и технологическим разбросом параметров резонаторов,

достигает $\pm 2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Соответственно, значения разности ТКЧ пар резонаторов находятся в диапазонах, границы которых отклонены от средних значений на $\pm 4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Таблица 4. Параметры конструкции резонаторов и расчетные значения их ТКЧ

Срез кварца	Углы Эйлера	d_R , мкм	n_R	$\frac{d}{d_R}$	PFA	$\frac{d_{IDT}}{d_R}$	n_{IDT}	w , мкм	TCF , $10^{-6}/^\circ\text{C}$
70°Y-срез	(0, 160°, 90°)	2.26	500	0,5	0	0.998	200	140	90
	(0, 160°, 80°)	2.005	500	0,5	10°	1.012	220	400	-52
	(0, 160°, 37°)	1.87	500	1,75	-3°	0.996	400	150	42
78°X-срез	(90°, 168°, -62°)	1.875	500	1,375	0	0.997	140	250	53
	(90°, 168°, -120°)	2.03	400	1,625	-10°	1.01	140	400	-51
14°X-срез	(90°, 104°, -75°)	2.005	500	1,75	-3°	1.005	400	500	-66
	(90°, 104°, -168°)	1.74	500	1,75	-5°	1.005	400	50	29
32°X-срез	(90°, 122°, 90°)	1.91	500	1,625	-1°	1.004	240	400	-58
	(90°, 122°, -165°)	1.78	500	1,5	-6°	1.006	100	250	33
-40°Y-срез	(0, 50°, 0)	1.79	500	1,5	0	1.008	140	200	22
	(0, 50°, 60°)	1.9275	500	1,625	0	1.012	140	500	-46
-30°Y-срез	(0, 60°, 0)	1.765	500	1,25	0	1.008	140	150	23
	(0, 60°, 60°)	1.93	500	1,625	1°	1.008	140	500	-52
X-срез	(90°, 90°, -63°)	2.035	500	1,75	-8°	1.008	260	350	-53
	(90°, 90°, -170°)	1.74	500	1,625	-5°	1.006	100	200	28
Y-срез	(0, 90°, 0)	1.71	500	1,625	0	0.994	200	160	15
	(0, 90°, 45°)	1.825	500	1,375	4°	0.996	300	300	-34

4.2. Результаты измерения характеристик резонаторов на 70°Y-срезе кварца

На рисунке 40 приведено схематичное изображение структуры одной из пар параллельно соединенных резонаторов, изготовленных на 70°Y-срезе. В верхней части рисунка находится резонатор, в котором используется ВГБ с $\psi_{\min} = 90^\circ$ (соответствующие углы Эйлера (0, 160°, 90°)). В нижней части рисунка находится резонатор, в котором используется квази-рэлеевская волна с $\psi_{\max} = 80^\circ$ (соответствующие углы Эйлера (0, 160°, 80°)). Данное направление распространения было выбрано так, что бы K^2 квази-рэлеевской волны достигал значения 0,03%. При этом условии именно на 70°Y-срезе достигается максимальное значение Δ_{\max}

(наряду с тем, что на нем же достигается TC_{\min}). Расчетное значение PFA для квази-рэлеевской волны составляет 10° , т.е. направление распространения потока энергии отклонено от оси X на $80^\circ + 10^\circ = 90^\circ$ и совпадает направлением распространения ВГБ. В результате резонаторы располагаются строго параллельно.

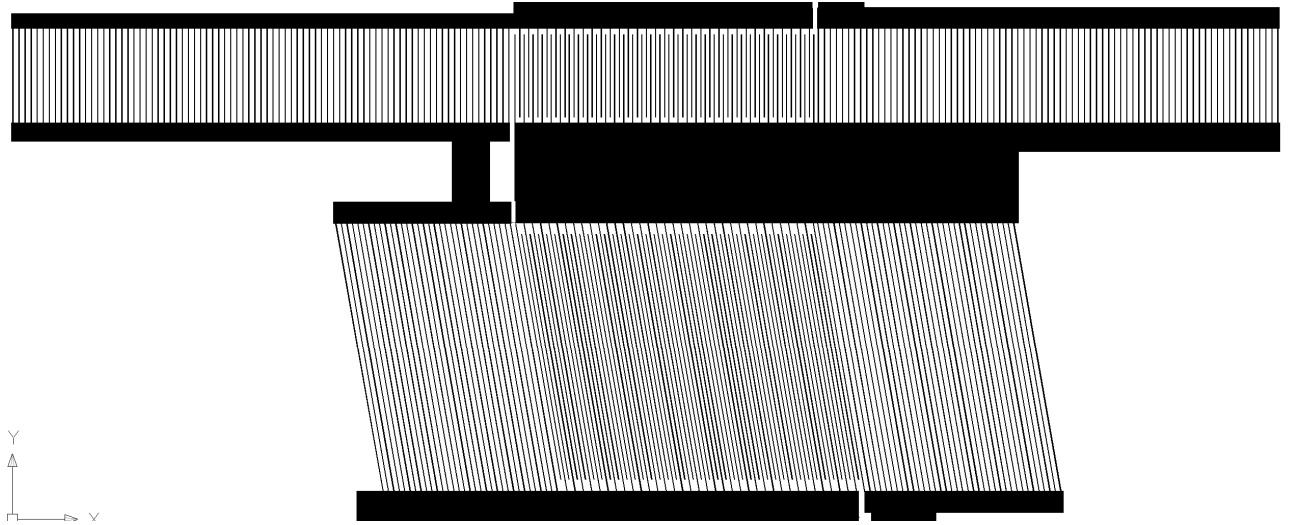


Рис. 40. Схематичное изображение топологии пары параллельно соединенных резонаторов, изготовленных на $70^\circ Y$ -срезе кварца

Графики расчетной и измеренной зависимости действительной части адмиттанса (проводимости) пары резонаторов от частоты, изображенных на рис. 40, приведены на рис. 41. Резонатору, использующему ВГБ, соответствует пик проводимости на более низкой частоте (около 914,4 МГц по расчету и около 911,6 МГц по измерению); резонатору, использующему квази-рэлеевскую волну, соответствует пик проводимости на более высокой частоте (около 917 МГц по расчету и около 918,7 МГц по измерению). Наблюдающееся отличие измеренных значений резонансных частот от расчетных на 0,3% и на 0,2% является вполне ожидаемым при использовании расчетных СОМ-параметров и обусловлено в первую очередь сильной зависимостью параметров формирующего электроды тонкопленочного покрытия от особенностей технологии его изготовления, что, как правило, приводит к необходимости коррекции первоначальных параметров конструкции устройств на ПАВ. Получение требуемой резонансной частоты возможно путем соответствующего изменения значения d_R (и связанных с ним значений d и d_{DT}); однако данное отклонение f_r от требуемых значений не существенно для целей измерения ТКЧ, поэтому для него использовались данные резонаторы.

Как видно на рис. 41, уровень побочных пиков проводимости и их расположение относительно основных пиков соответствуют расчету. На резонаторе для ориентации $(0, 160^\circ, 80^\circ)$ на наилучших образцах достигаются значения Q не менее 4000. На резонаторе для ориентации $(0, 160^\circ, 90^\circ)$ на наилучших образцах достигаются значения Q не менее 3500.

Предположительно при доработке конструкции после детального изучения влияния на достижимую добротность толщины электродов, апертуры ВШП и других параметров, а также при использовании более совершенной технологии изготовления резонаторов, позволяющей получить лучшую равномерность толщины и ширины электродов, возможно получение более высоких значений Q . Тем не менее, уже имеющийся результат позволяет говорить о том, что для данных впервые предложенных ориентаций подложки (в публикациях упоминания об их использовании не обнаружены) получены работоспособные образцы резонаторов на ПАВ с приемлемой добротностью и приемлемым уровнем побочных пиков проводимости. Это подтверждает возможность использования подложек с предложенными ориентациями для изготовления резонаторов на ПАВ.

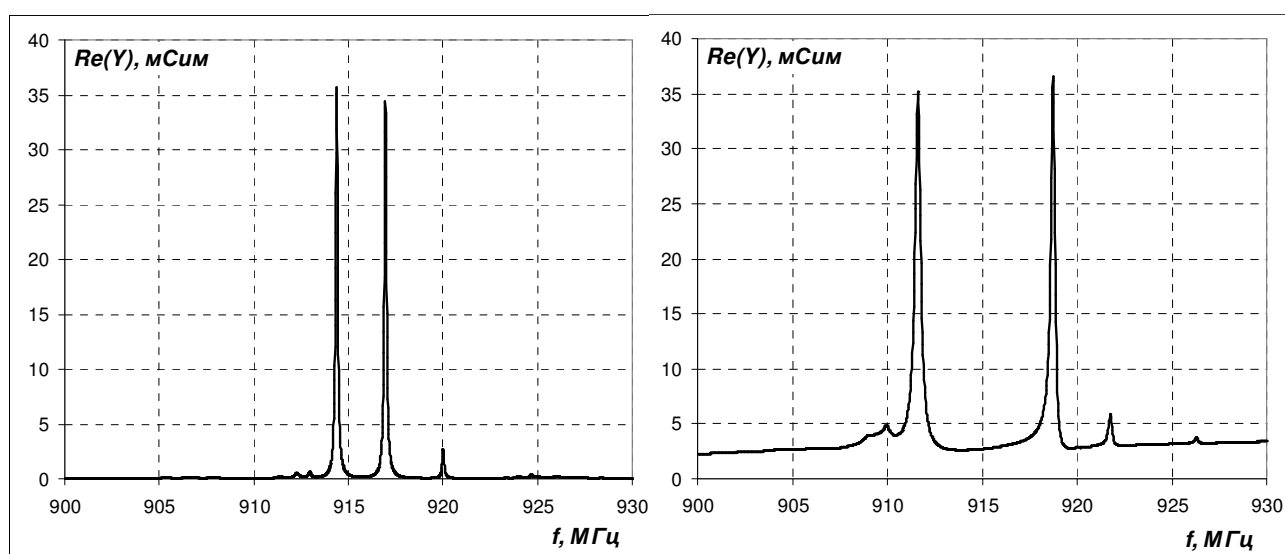


Рис. 41. Расчетная (слева) и измеренная (справа) зависимость действительной части адмиттанса Y пары резонаторов на $70^\circ Y$ -срезе кварца от частоты f

На рисунке 42 приведены графики зависимости от температуры резонансных частот пары резонаторов, частотная характеристика которой приведена на рис. 41. Погрешность измерения ТКЧ обусловлена конечным разрешением измеренных частотных характеристик и погрешностью измерения температуры. Измеренные значения ТКЧ разных образцов резонатора для ориентации $(0, 160^\circ, 90^\circ)$ находятся в диапазоне от $80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $84 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Измеренные значения ТКЧ разных образцов резонатора для ориентации $(0, 160^\circ, 80^\circ)$ находятся в диапазоне от $-54 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $-58 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Разность ТКЧ составляет от $134 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $142 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Эксперимент подтверждает, что разность ТКЧ данной пары резонаторов заметно превышает ожидаемые значения разности ТКЧ всех других пар резонаторов. Измеренное для ориентации $(0, 160^\circ, 90^\circ)$ значение TCF более $80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ так же подтверждает возможность получения разницы ТКЧ пары резонаторов на разных подложках более $170 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (в сочетании с

резонаторами на подложках из ниобата лития, у которых TCF достигает значений ниже $-90 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [5]).

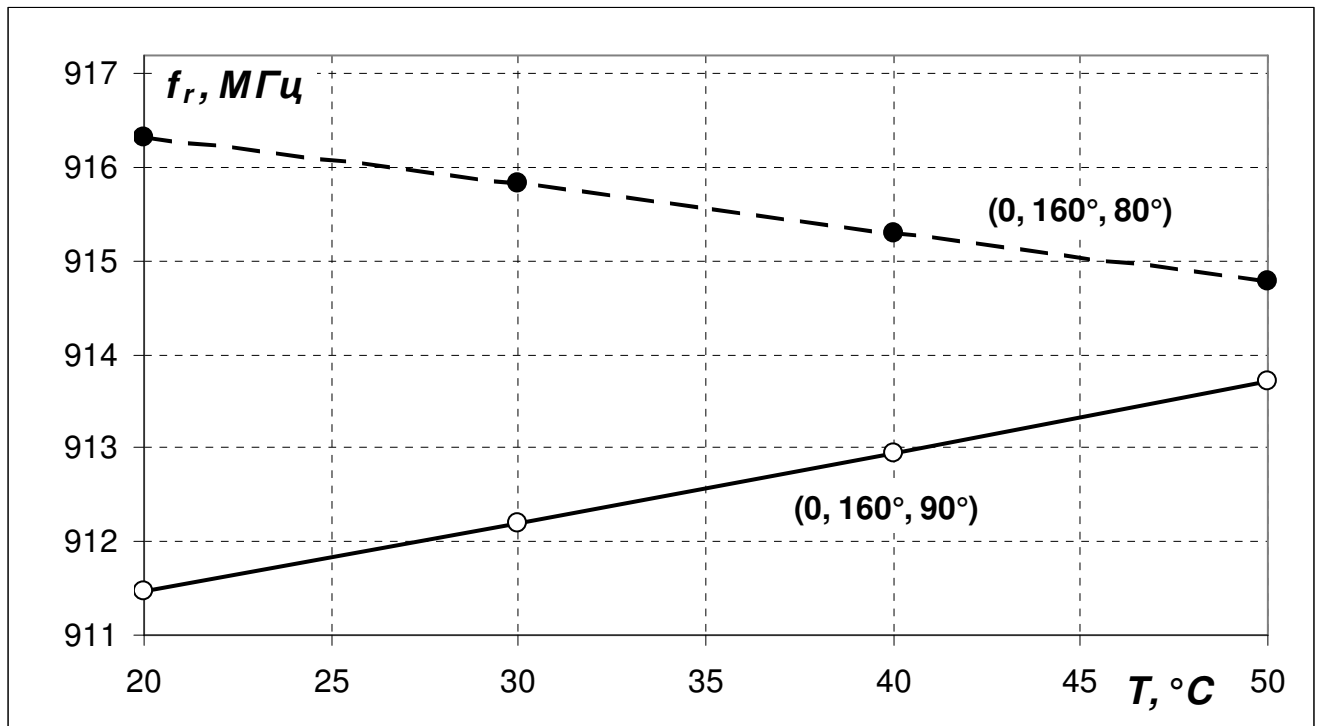


Рис. 42. Зависимость измеренных значений резонансной частоты f_r пары резонаторов на 70°Y -срезах кварца от температуры T

Отличие измеренных значений ТКЧ от расчетных для этих резонаторов достигает $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, что является удовлетворительным соответствием для применения расчета в целях сравнения различных подложек и выбора наиболее подходящих из них, а также в целях проектирования прототипов устройств (для целей проектирования рабочих устройств требуется более точный расчет или использование экспериментальных данных). Более подробное соответствие расчетных и экспериментальных данных будет при анализе всей совокупности результатов проведенных измерений ТКЧ.

На этом же срезе изготовлена пара резонаторов, в которой используются только ПАВ с наименьшей скоростью. В данном случае в резонаторе с положительным ТКЧ используется ПАВ, распространяющаяся под углом 37° к оси X (углы Эйлера $(0, 160^{\circ}, 37^{\circ})$). Добротность этих резонаторов оказалась в лучшем случае около 600. Маловероятно, что достижение более высоких значений Q невозможно; скорее всего, столь низкое значение связано с тем, что случайно все резонаторы для данной ориентации оказались изготовлены с существенными дефектами; также возможно, что в данном случае требуется корректировка конструкции резонатора с учетом экспериментальных данных. Однако пока нельзя утверждать, что на этой подложке возможно изготовление резонатора с приемлемой характеристикой (хотя и нет

оснований утверждать, что это невозможно). Измеренное значение ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 160^\circ, 37^\circ)$ составило около $31 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, разница ТКЧ пары резонаторов составила около $87 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что, как и ожидалось, примерно в 1,5 раза меньше, чем для пары резонаторов с использованием в резонаторе с положительным ТКЧ ВГБ. Сравнение двух пар резонаторов на 70°Y -среze кварца приведено в [A3]. Пара резонаторов, в состав которой входит резонатор, использующий ВГБ, применена в качестве чувствительного элемента имплантируемого в живую ткань датчика температуры [A8, A9].

4.3. Результаты измерения характеристик резонаторов на других срезах кварца

На рисунке 43 приведены графики зависимости резонансных частот пары резонаторов, изготовленных на подложке из 78°X -среза кварца. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(90^\circ, 168^\circ, -62^\circ)$ в среднем составили $52 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 2600. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(90^\circ, 168^\circ, -120^\circ)$ в среднем составили $-25 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 4300. Разность ТКЧ составляет около $77 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

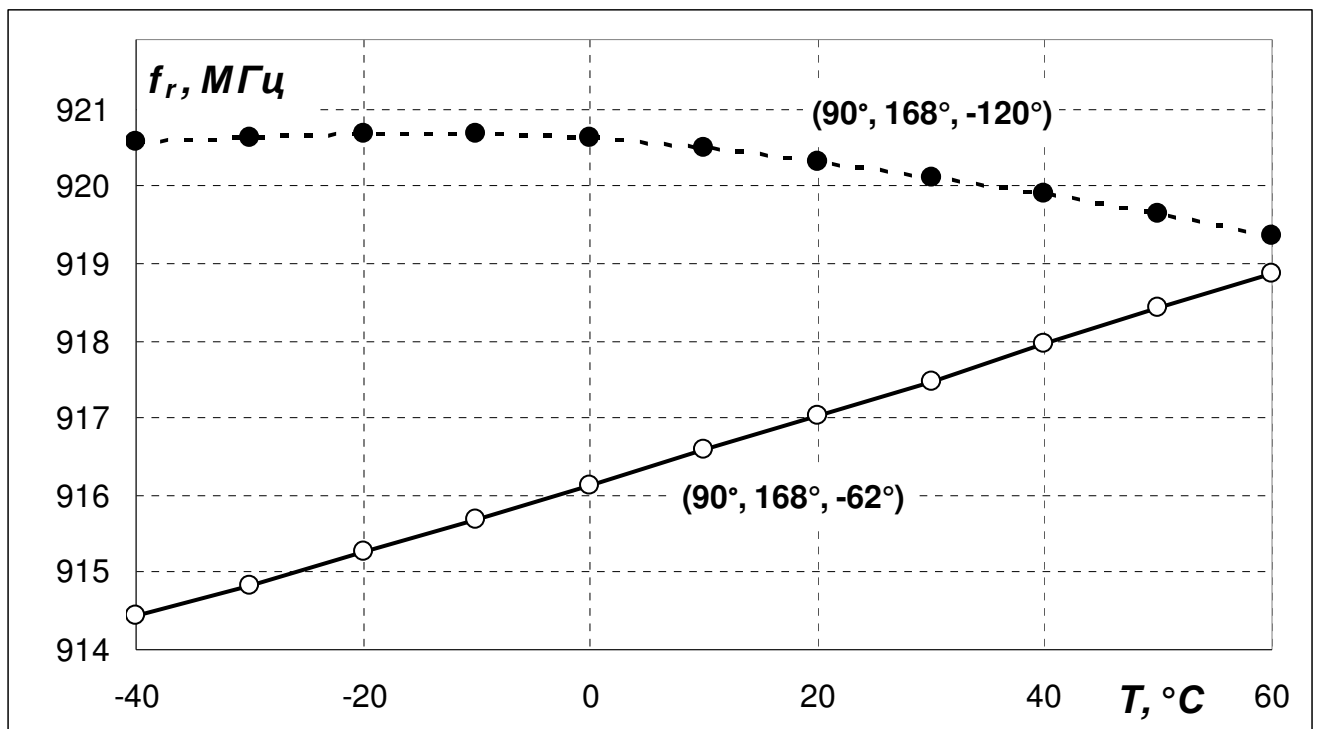


Рис. 43. Зависимость измеренных значений резонансной частоты f_r пары резонаторов на 78°X -среze кварца от температуры T

Зависимость частоты от температуры для ориентации (90° , 168° , -120°) существенно отличается от расчетной. При температуре $30..40^\circ\text{C}$ расчетный ТКЧ отличается от измеренного на $24..28 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Помимо этого, зависимость имеет более выраженную нелинейность по сравнению с расчетной: температурный коэффициент второго порядка по результатам измерений составляет около $-23 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$, а по результатам расчета он составляет около $-12 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$. В данном расчете не приняты во внимание температурные коэффициенты второго порядка алюминия, что может быть причиной существенного расхождения, однако для других ориентаций подложки столь сильного расхождения не наблюдается. Более подробно возможные причины несоответствия результатов расчета и эксперимента для данной ориентации будут рассмотрены при обсуждении соответствия всех расчетных и экспериментальных данных. Пока результаты эксперимента не подтверждают, что данный срез подходит для получения высокой (около $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) разности ТКЧ пары резонаторов (хотя и нет оснований утверждать, что он не подходит для этих целей, поскольку не исключено достижение более высокого по абсолютной величине отрицательного ТКЧ при использовании ПАВ, распространяющихся в других направлениях).

На рисунке 44 приведены графики зависимости резонансных частот пары резонаторов, изготовленных на подложке из 14°X -среза кварца. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации (90° , 104° , -75°) в среднем составили $-67 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 3800. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации (90° , 104° , -168°) в среднем составили $33 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 4600. Разность ТКЧ составляет около $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что, в отличие от вышеописанных срезов, немного превышает расчетное значение. Эксперимент подтверждает возможность получения Δ_{TCF} около $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ на данном срезе, и он может быть использован для изготовления датчика, в котором требуется такая величина Δ_{TCF} ; но расчет предсказывает наличие возможности при использовании ВГБ получить такое же значение Δ_{TCF} при почти вдвое большем значении K_{\min}^2 (рис. 23).

Среди пар резонаторов, изготовленных на остальных пяти подложках, наибольшее значение Δ_{TCF} было получено у пары резонаторов на 32°X -срезе (как и ожидалось в соответствии с результатами расчета). Графики зависимости резонансных частот этих резонаторов от температуры приведены на рис. 45. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации (90° , 122° , 90°) в среднем составили $-60 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 4300. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации (90° , 122° , -165°) в среднем составили $37 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 5200. Разность ТКЧ составляет около $97 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что также немного превышает расчетное значение. Таким образом, данный срез может использоваться для получения Δ_{TCF} около $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ наравне с 32°X -срезом. Полученный результат показывает, что в данной области ориентаций срезов Δ_{TCF} сравнительно слабо изменяется с изменением

ориентации среза, т.е. возможно использование других и срезов с близкой ориентацией, при этом расширяется возможность для получения лучших значений других параметров помимо Δ_{TCF} (в первую очередь добротности, которая на $32^\circ X$ -срезе превышает 4000 у обоих резонаторов, чего не было получено на вышеупомянутых срезах).

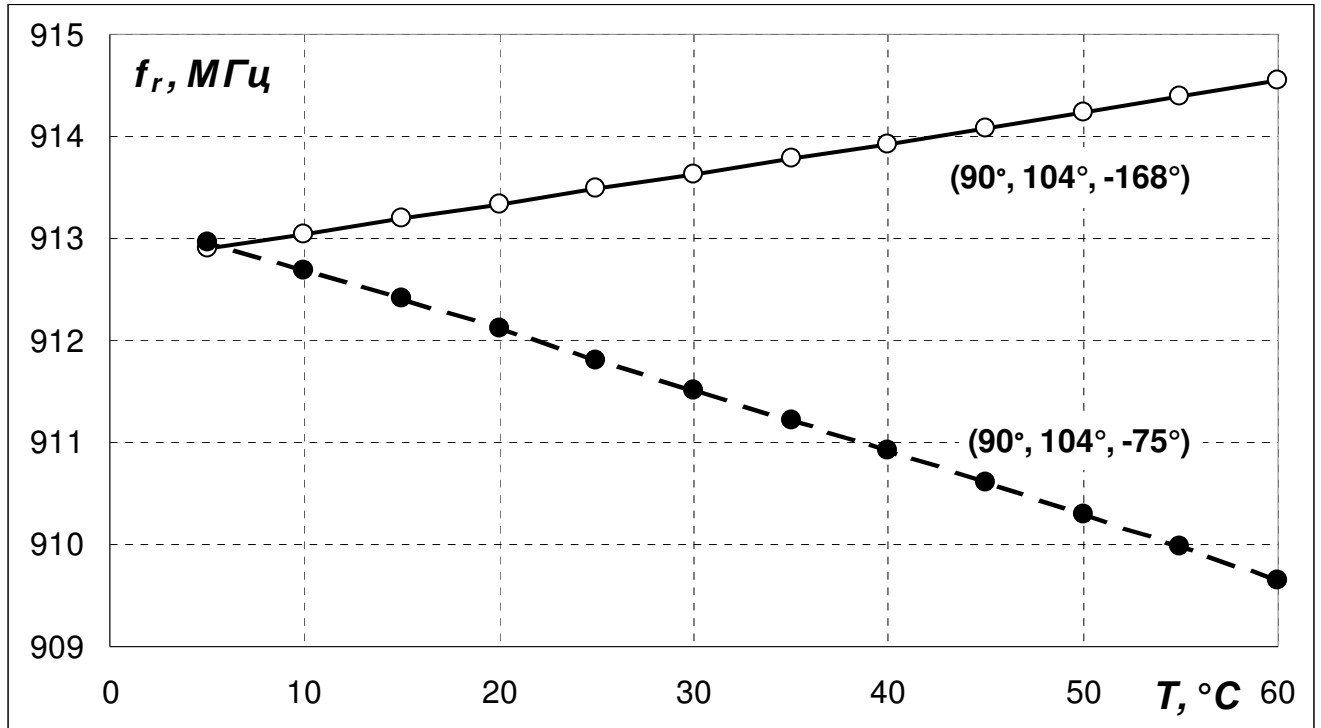


Рис. 44. Зависимость измеренных значений резонансной частоты f_r пары резонаторов на $14^\circ X$ -срезе кварца от температуры T

На рисунке 46 приведены графики зависимости резонансных частот от температуры для резонаторов, изготовленных на остальных четырех срезах. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 50^\circ, 0)$ в среднем составили $25 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 4300. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 50^\circ, 60^\circ)$ в среднем составили $-43 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 1900. В результате разность ТКЧ для $-40^\circ Y$ -среза составляет около $68 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 60^\circ, 0)$ в среднем составили $26 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 5200. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 50^\circ, 60^\circ)$ в среднем составили $-48 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 6100. В результате разность ТКЧ для $-30^\circ Y$ -среза составляет около $74 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Расчетные значения Δ_{TCF} для этих двух срезов находятся в пределах разброса измеренных значений от образца к образцу. Для изготовления датчиков данные подложки, скорее всего, интереса не представляют (поскольку существует много вариантов, позволяющих при таких значениях Δ_{TCF} получить более высокие значения K^2). Для целей данного исследования они оказались интересны как материал для получения дополнительных экспериментальных данных,

показывающих применимость проведенных расчетов к реальным объектам (при этом важно, что ориентация этих подложек существенно отличается от ориентации других подложек, используемых для эксперимента).

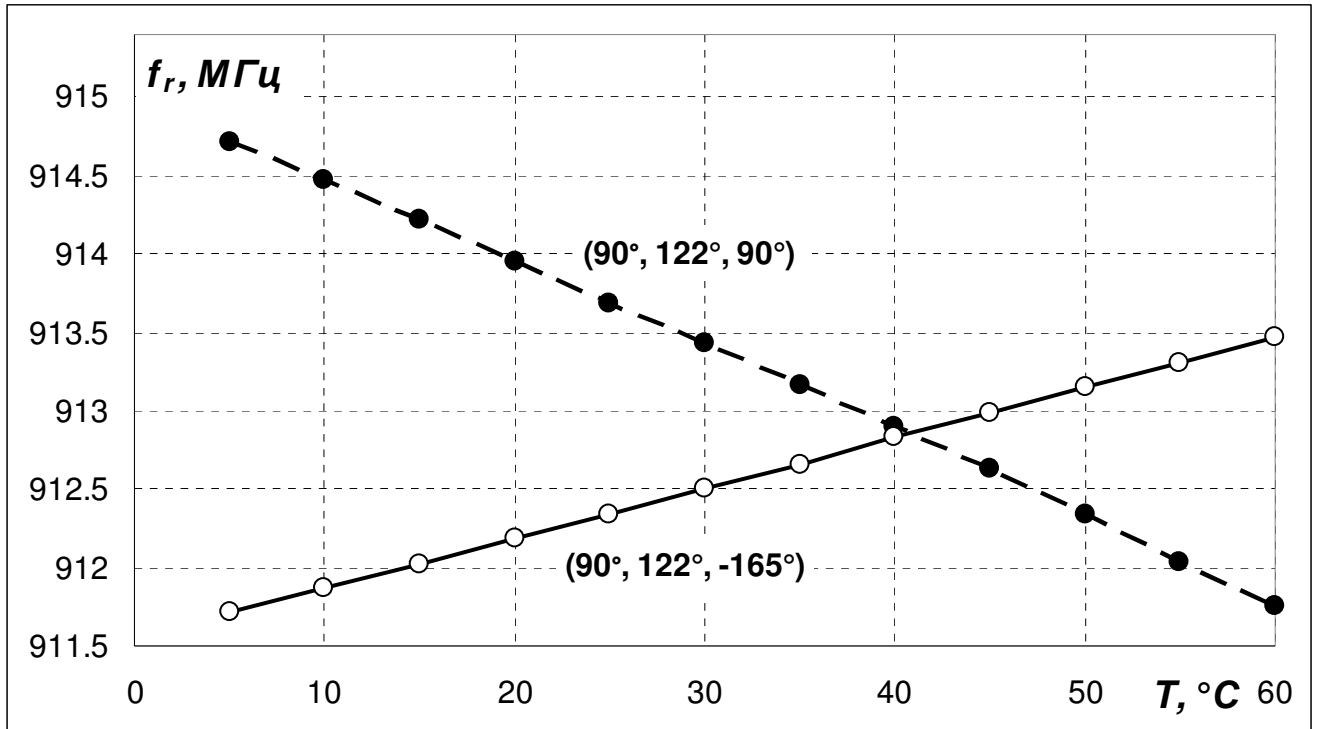


Рис. 45. Зависимость измеренных значений резонансной частоты f_r пары резонаторов на $32^\circ X$ -среze кварца от температуры T

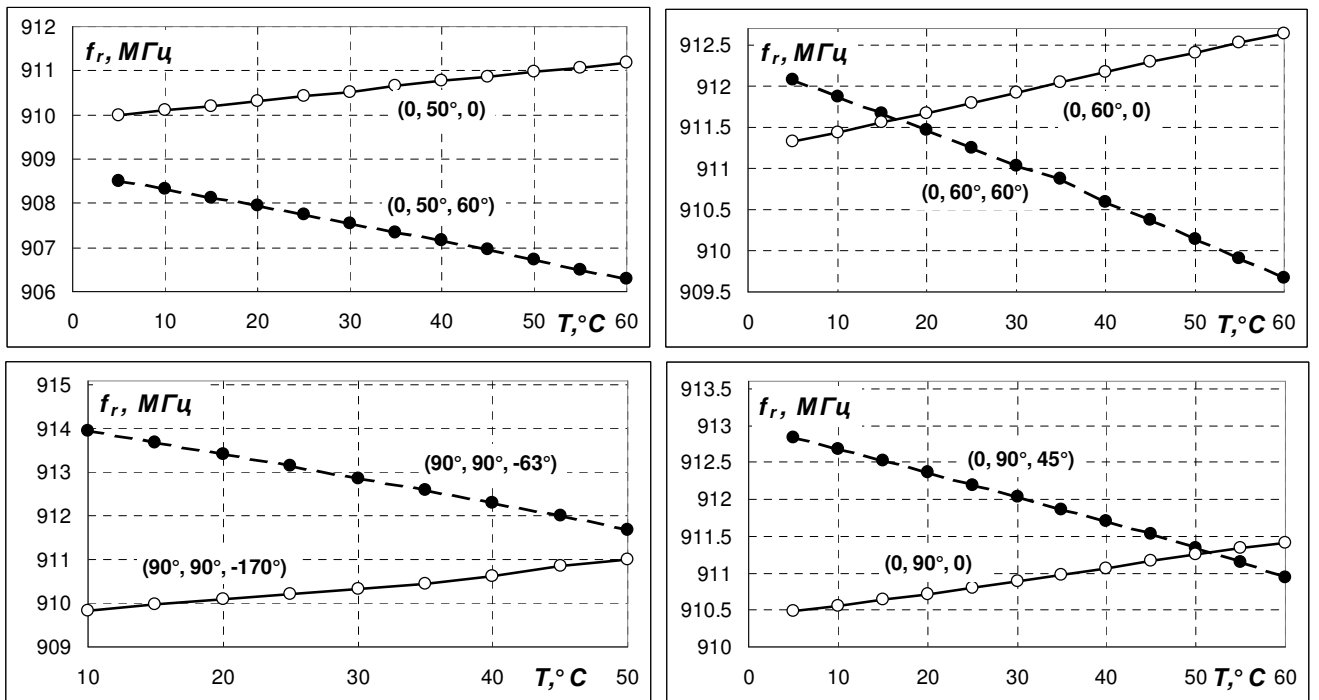


Рис. 46. Зависимость измеренных значений резонансной частоты f_r пар резонаторов на $-40^\circ Y$ -среze (вверху слева), $-30^\circ Y$ -среze (вверху справа), X -среze (внизу слева) и Y -среze кварца (внизу справа) от температуры T

Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(90^\circ, 90^\circ, -63^\circ)$ в среднем составили $-56 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 6000. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(90^\circ, 90^\circ, -170^\circ)$ в среднем составили $29 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 5500. В результате разность ТКЧ для X-среза составляет около $85 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 90^\circ, 0)$ в среднем составили $19 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 6500. Измеренные значения ТКЧ резонаторов для ориентации $(0, 90^\circ, 45^\circ)$ в среднем составили $-37 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, добротность достигает 6100. В результате разность ТКЧ для Y-среза составляет около $56 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Измеренные значения Δ_{TCF} превышают расчетные. На данных подложках получены более высокие значения добротности, чем на подложках с большими значениями Δ_{TCF} (более 5000 у обоих резонаторов на X-срезе и более 6000 у обоих резонаторов на Y-срезе).

X-срез может быть использован для изготовления датчика, в котором требуется Δ_{TCF} около $80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, хотя расчет предсказывает возможность получить при использовании ВГБ такое же значение Δ_{TCF} при почти в 4 раза большем значении K_{\min}^2 , а также получить такое же значение Δ_{TCF} в сочетании с вдвое большим значением K_{\min}^2 при использовании только ПАВ с наименьшей скоростью (рисунок 23). Для датчиков с меньшими значениями Δ_{TCF} может быть использован также Y-срез; в частности, в данном эксперименте получено значение Δ_{TCF} около $50 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в сочетании с $K_{\min}^2 = 0,5\%$ (по расчету на X-срезе при $K_{\min}^2 = 0,5\%$ также достигается Δ_{TCF} около $50 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). Согласно расчету при использовании других подложек из кварца такое же значение Δ_{TCF} можно получить при вдвое большем значении K_{\min}^2 (рис. 23), а при использовании подложек из лангасита такое же значение Δ_{TCF} можно получить при почти втрое большем значении K_{\min}^2 (рис. 29). Однако преимуществом X-среза и Y-среза является массовое производство подложек из них и, следовательно, их меньшая стоимость и возможность приобретения в максимально короткий срок без дополнительных процедур согласования спецификаций заказчиком и изготовителем. Кроме того, для этих срезов получено экспериментальное подтверждение возможности получения достаточно высокой добротности резонаторов с рабочей частотой около 900 МГц при использовании контактной фотолитографии.

4.4. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений ТКЧ

Результаты измерения и расчета ТКЧ всех резонаторов, изготовленных на вышеперечисленных срезах, сведены вместе в табл. 5. Сравняются значения TCF , полученные исходя из приближения $TCF \approx -TCD$ для свободной поверхности, и его значения, полученные исходя из приближения $TCF \approx -TCD$ для эквивалентного слоя алюминия. Измеренные значения приведены с разбросом $\pm 2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, что соответствует максимальному разбросу значений ТКЧ измеренных на разных образцах резонаторов одной и той же конструкции (для некоторых ориентаций подложки разброс меньше, однако небольшое число образцов не дает оснований полагать, что для них разброс действительно ниже, чем для других ориентаций). В таблице 5 также сравниваются значения Δ_{TCF} , полученные из значений TCF , рассчитанных двумя вышеописанными способами и полученные из измеренных значений TCF .

Таблица 5. Расчетные и измеренные значения ТКЧ резонаторов и разности ТКЧ пар резонаторов

Срез кварца	Углы Эйлера	$TCF, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$			$\Delta_{TCF}, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		
		расчет		измерение	расчет		измерение
		свободная поверхность	эквивалентный слой		свободная поверхность	эквивалентный слой	
70°Y-срез	(0, 160°, 90°)	91	90	82 ± 2	135	142	138 ± 4
	(0, 160°, 80°)	-44	-52	-56 ± 2			
	(0, 160°, 37°)	45	42	31 ± 2	99	94	87 ± 4
78°X-срез	(90°, 168°, -62°)	55	53	52 ± 2	100	104	77 ± 4
	(90°, 168°, -120°)	-45	-51	-25 ± 2			
14°X-срез	(90°, 104°, -75°)	-63	-66	-67 ± 2	99	95	100 ± 4
	(90°, 104°, -168°)	36	29	33 ± 2			
32°X-срез	(90°, 122°, 90°)	-54	-58	-60 ± 2	94	91	97 ± 4
	(90°, 122°, -165°)	40	33	37 ± 2			
-40°Y-срез	(0, 50°, 0)	24	22	25 ± 2	66	68	68 ± 4
	(0, 50°, 60°)	-42	-46	-43 ± 2			
-30°Y-срез	(0, 60°, 0)	28	23	26 ± 2	75	75	74 ± 4
	(0, 60°, 60°)	-47	-52	-48 ± 2			
X-срез	(90°, 90°, -63°)	-52	-53	-56 ± 2	88	81	85 ± 4
	(90°, 90°, -170°)	36	28	29 ± 2			
Y-срез	(0, 90°, 0)	22	15	19 ± 2	52	49	56 ± 4
	(0, 90°, 45°)	-30	-34	-37 ± 2			

Для 13 резонаторов из 17 отклонение измеренного значения ТКЧ от расчетного значения, вычисленного без учета эквивалентного слоя, не превышает $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Исключением являются резонаторы, изготовленные на подложках с ориентациями $(0, 160^{\circ}, 90^{\circ})$, $(0, 160^{\circ}, 80^{\circ})$, $(0, 160^{\circ}, 37^{\circ})$ и $(90^{\circ}, 168^{\circ}, -120^{\circ})$, для которых это отклонение достигает $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $14 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и $22 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, соответственно. Данный результат сравнения позволяет считать проведенный расчет приемлемым для идентификации областей ориентаций подложки для получения определенных значений ТКЧ. При этом для точного определения подходящей ориентации требуется либо ее экспериментальный подбор, либо расчет с использованием более точного описания ТКЧ и, возможно, с использованием более точных данных о параметрах материала.

Расчетные значения ТКЧ, полученные с учетом эквивалентного слоя и без него, в среднем примерно одинаково отличаются от измеренных значений; в целом учет эквивалентного слоя не дает повышения точности расчета. Это может быть связано с тем, что ошибка, обусловленная неточностью параметров кварца, превышает поправку, которую дает учет эквивалентного слоя. Другая возможная причина заключается в низкой точности данных по температурному поведению параметров тонкой пленки из алюминия, которые к тому же могут существенно зависеть от технологии ее изготовления, а также от температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) подложки (за счет возникновения в пленке из-за разности ТКЛР механических напряжений, зависящих от температуры). Еще одна возможная причина заключается в недостаточной точности модели эквивалентного слоя для оценки влияния электродов на ТКЧ резонатора.

Более сильное различие измеренных и расчетных значений ТКЧ для отдельных подложек может быть связано с более сильным отличием характеристик ПАВ, распространяющихся в периодической структуре из электродов, от характеристик ПАВ, распространяющихся вдоль свободной поверхности и поверхности с эквивалентным слоем. Другая возможная причина заключается в более сильном влиянии изменения с температурой коэффициента отражения ПАВ от электродов, которое проявляется сильнее при более высоких значениях коэффициента отражения. Еще одна возможная причина заключается в более сильной зависимости характеристик ПАВ от ориентации подложки и более сильной зависимости расчетных характеристик ПАВ от точности параметров материала подложки (одно связано с другим, так как небольшое изменение ориентации эквивалентно небольшому изменению параметров материала). В таблице 6 приведены значения наибольшего отклонения расчетных значений ТКЧ от измеренных (для двух вариантов расчета: для свободной поверхности и эквивалентного слоя) вместе с величинами, характеризующими вышеперечисленные факторы. Отличие характеристик ПАВ в периодической структуре

характеризуется отношением $\frac{K_{eff}^2}{K^2}$ (K^2 рассчитан для ПАВ, распространяющейся вдоль поверхности с эквивалентным слоем). Влияние коэффициента отражения характеризуется его величиной (приходящейся на один электрод периодической структуры) R_{el} . Чувствительность характеристик ПАВ к изменению ориентации (и неточности параметров материала) характеризуется производной ТКЗ по третьему углу Эйлера $\left| \frac{\partial TCD}{\partial \psi} \right|$.

Таблица 6. Отклонения расчетных значений ТКЧ от измеренных и параметры, с которыми связаны их значения

Ориентация подложки из кварца	Отклонение расчетных TCF от измеренных, $10^{-6}/^{\circ}C$		$\frac{K_{eff}^2}{K_c^2}$	$R_{el}, \%$	$\left \frac{\partial TCD}{\partial \psi} \right $, ($10^{-6}/^{\circ}C$) $^{\circ}$
	свободная поверхность	эквивалентный слой			
(90°, 168°, -120°)	22	28	1,64	5,3	5,3
(0, 160°, 37°)	15	13	1,66	0,6	0,3
(0, 160°, 80°)	14	6	1,5	5	1,8
(0, 160°, 90°)	11	10	1,47	1,8	0
(0, 90°, 45°)	9	5	0,93	1,9	2,7
(90°, 90°, -170°)	9	3	1,01	2,2	0
(90°, 122°, 90°)	8	4	1,03	1	0,1
(90°, 90°, -63°)	6	5	1,02	2,2	1,7
(90°, 104°, -75°)	6	3	1,07	0,8	0,5
(0, 90°, 0)	5	6	1,07	1,3	0
(90°, 122°, -165°)	5	6	1,05	0,9	0,1
(90°, 104°, -168°)	5	6	1,01	1,8	0
(90°, 168°, -62°)	5	3	2,07	1,1	0,9
(0, 60°, 0)	4	5	1,19	1,1	0
(0, 50°, 60°)	3	5	1,05	2,1	0
(0, 50°, 0)	3	5	1,07	1,3	0
(0, 60°, 60°)	3	6	0,99	2,1	0,2

В случае подложки с ориентацией (90°, 168°, -120°), для которой обнаружилось существенное отклонение расчетного ТКЧ от измеренного, все три фактора оказывают сильное

влияние, причем значение $\left| \frac{\partial TCD}{\partial \psi} \right|$ существенно выше, чем для всех других ориентаций, а значение R_{el} также максимально и существенно превышает значения R_{el} для всех других ориентаций, за исключением $(0, 160^\circ, 80^\circ)$. Для всех четырех ориентаций с наибольшим отклонением расчетного ТКЧ от измеренного значение $\frac{K_{eff}^2}{K^2} > 1,4$, в то время как для большинства ориентаций $0,9 < \frac{K_{eff}^2}{K^2} < 1,1$. Для двух из четырех таких ориентаций также свойственны нетипично высокие значения $\left| \frac{\partial TCD}{\partial \psi} \right|$ и R_{el} . Как и следовало ожидать, большие значения приведенных параметров не обязательно приводят к большому отклонению расчетного ТКЧ от измеренного (например, для ориентации $(90^\circ, 168^\circ, -120^\circ)$ с максимальным $\frac{K_{eff}^2}{K^2}$ оно не превышает типичного значения), но они говорят о высокой вероятности получения большого отклонения расчетного ТКЧ от измеренного. Данные параметры могут использоваться для оценки применимости результатов расчета ТКЗ ПАВ для расчета значений ТКЧ резонаторов, изготовленных на определенной подложке с определенными электродами.

4.5. Добротность и коэффициент связи экспериментально исследованных резонаторов

Результаты измерения добротности резонаторов, изготовленных на вышеперечисленных срезах, и их коэффициента связи (для некоторых из них) сведены вместе в табл. 7. В ней также приведены расчетные значения K_c , значения произведения $K_c Q$, рассчитанные с использованием измеренных значений Q и измеренных (при наличии) и расчетных значений K_c . Также приведены значения $K_c Q$, рассчитанные с использованием расчетных значений K_c и максимального из измеренных значений Q , что дает представление о значениях $K_c Q$, потенциально достижимых при изготовлении резонатора с улучшенной добротностью.

Измеренные значения K_c меньше расчетных (наиболее сильно отличающиеся значения вдвое меньше расчетных). Это можно объяснить наличием дополнительной емкости за счет контактных площадок, а также разрывами части электродов. При малых значениях K_c (менее 0,05%) погрешность его вычисления по значениям частот последовательного и параллельного резонансов резко возрастает, поскольку разность этих частот становится близкой к погрешности их измерения. Для таких случаев в табл. 7 приведена оценка сверху: $K_c < 0,05\%$.

Из семи экспериментальных значений $K_c Q$ четыре значения близки к 4, что позволяет получить близкую к максимальной ($\eta \approx 60\%$) эффективность переизлучения энергии одиночным резонатором, и достаточно высокую эффективность ($\eta \approx 50\%$) при параллельном соединении пары резонаторов. Значения $K_c Q$ близкие к 2 еще позволяют получить $\eta \approx 50\%$ для одиночного резонатора и $\eta \approx 30\%$ (вдвое меньше максимально возможного) для пары резонаторов, меньшие значения приводят к существенному проигрышу в эффективности переизлучения энергии (рис. 13). Два экспериментальных значения $K_c Q$ находятся в диапазоне от 2 до 4, и одно значение менее 2 (получено при сравнительно низкой добротности). Причем все измеренные значения K_c относятся к резонаторам со сравнительно высокими K_c , другие резонаторы из пар имеют значительно меньшие K_c и, соответственно, значительно меньшие значения $K_c Q$.

Таблица 7. Значения добротности Q , коэффициента связи K_c и произведения $K_c Q$

Ориентация подложки из кварца	Q	$K_c, \%$		$K_c Q$		
		расчет	измерение	измеренные K_c и Q	расчетный K_c	
					измеренная Q	наибольшая Q (6500)
(0, 160°, 90°)	3500	0,13	0,11	3,8	4,6	8,5
(0, 160°, 80°)	4000	0,039	< 0,05	< 2	1,6	2,5
(0, 160°, 37°)	600	0,054	< 0,05	< 0,3	0,3	3,5
(90°, 104°, -75°)	3800	0,015	< 0,05	< 1,9	0,6	1,0
(90°, 104°, -168°)	4600	0,15	0,07	3,2	6,9	9,8
(90°, 122°, 90°)	4300	0,024	< 0,05	< 2,2	1,0	1,6
(90°, 122°, -165°)	5200	0,09	0,08	4,1	4,7	5,9
(90°, 90°, -63°)	6000	0,029	< 0,05	< 3	1,7	1,9
(90°, 90°, -170°)	5500	0,13	0,07	3,6	7,2	8,5
(90°, 168°, -62°)	2600	0,072	0,07	1,7	1,9	4,7
(90°, 168°, -120°)	4300	0,046	< 0,05	< 2,2	2,0	3,0
(0, 60°, 0)	5200	0,08	0,05	2,5	4,2	5,2
(0, 60°, 60°)	6100	0,02	< 0,05	< 3,1	1,2	1,3
(0, 50°, 0)	4300	0,072	< 0,05	< 2,2	3,1	4,7
(0, 50°, 60°)	1900	0,027	< 0,05	< 1	0,5	1,8
(0, 90°, 0)	6500	0,11	0,07	4,3	7,2	7,2
(0, 90°, 45°)	6100	0,036	< 0,05	< 3,1	2,2	2,3

Согласно оценке значений $K_c Q$, сделанной с использованием измеренных Q и расчетных K_c , на исследованных подложках произведение $K_c Q$ резонатора, имеющего меньший K_c по сравнению с другим резонатором пары, не превышает 2,2. Причем среди срезов с $\Delta_{TCF} > 80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ оно не превышает 1,7. Если рассматривать возможность изготовления резонаторов с более высокой добротностью, то при $Q = 6500$ значение $K_c Q$ для всех резонаторов с меньшим K_c не превышает 3, а для срезов с $\Delta_{TCF} > 80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ оно не превышает 2,5. Таким образом, при работе в данном диапазоне частот, для достижения максимальной эффективности переизлучения датчиком энергии опрашивающего сигнала актуально использование ПАВ с большими значениями КЭМС.

Эксперимент также показал возможность получения сравнительно высокой добротности резонаторов на ПАВ при различных значениях PFA (до 10°) и γ (от $-4,8$ до $2,6$). Это говорит в пользу того, что при выборе подложки для резонаторов можно не ограничивать значения этих параметров, и выбирать подложку с наилучшим сочетанием K_c и TCD независимо от того, какие ей свойственны значения PFA и γ . Сопоставление значений добротности со значениями этих параметров, а также со значениями апертуры, величины побочных пиков проводимости и удаленности резонансной частоты от частоты генерации ОАВ, приведено в [A18]. Измеренные характеристики резонаторов на X -срезе и Y -срезе (где были получены наибольшие добротности обоих резонаторов) отличаются более высоким уровнем побочных пиков проводимости: их величина составляет не менее 10% от величины основного пика, в то время как у резонаторов, изготовленных на других срезах, она не превышает 2,5% от величины основного пика. Возможно, это показатель того, что одновременное достижение высокой добротности и малого уровня побочных пиков проводимости затруднительно (хотя оно, по меньшей мере, не невозможно, что демонстрирует резонатор на подложке с ориентацией $(0, 60^\circ, 60^\circ)$, у которого $Q > 6000$ сочетается с уровнем побочных пиков менее 1% от величины основного).

На наиболее интересной для получения высокого значения Δ_{TCF} паре резонаторов с ориентациями $(0, 160^\circ, 90^\circ)$ и $(0, 160^\circ, 80^\circ)$ большее значение $K_c Q$ имеет резонатор, в котором используется ВГБ. Экспериментальное значение $K_c Q$ незначительно ниже 4, что позволяет получать высокую эффективность переизлучения энергии. Важным результатом является экспериментальное подтверждение того, что превышение скоростью ВГБ скорости не связанной с ней ОАВ не мешает получению приемлемой добротности резонатора на ПАВ на этой подложке. У резонатора для ориентации $(0, 160^\circ, 80^\circ)$, в котором используется квази-рэлеевская волна, по оценке с использованием расчетного K_c значение $K_c Q \approx 1,6$. В случае, если найдется возможность повышения его добротности с измеренных 4000 до 6500 (максимальное из измеренных значений среди всех резонаторов), значение $K_c Q$ достигнет только 2,5. То есть для этого резонатора может быть полезным использование ориентации с большим КЭМС, что

может позволить получить большее значение $K_c Q$. Результаты измерения параметров резонаторов на вышеупомянутых подложках из кварца приведены в [A15, A18], результаты измерения K_c на некоторых подложках приведены в [A16]. Подробное обсуждение результатов измерения дано в [A18].

4.6. Варьирование направления распространения квази-рэлеевской ПАВ на $70^\circ Y$ -среze кварца

По мере отклонения направления распространения ПАВ от направления, перпендикулярного оси X (этому соответствует отклонение угла ψ от 90°), ТКЗ квази-рэлеевской волны на $70^\circ Y$ -среze снижается, а КЭМС увеличивается. Что, соответственно, приводит к увеличению (снижению по абсолютной величине) ТКЧ резонатора и росту его коэффициента связи. Графики расчетной зависимости TCF и K^2 от направления распространения приведены на рис. 47. Все параметры ПАВ рассчитаны для поверхности подложки, покрытой слоем алюминия толщиной 1,275% от длины волны (как видно в табл. 6, для ориентации $(0, 160^\circ, 80^\circ)$ учет эквивалентного слоя дает существенное приближение расчетного значения ТКЧ к измеренному). На этом же рисунке график зависимости $PFA(\psi)$ сравнивается с линией значений PFA , соответствующих распространению потока энергии перпендикулярно оси X . Как видно на рисунке, в данном диапазоне угла ψ направление распространения потока энергии почти не зависит от направления распространения и отличается от направления, перпендикулярного оси X , не более чем на 1° .

С учетом данного поведения PFA вариация направления распространения ПАВ была реализована в виде вариации угла наклона электродов при сохранении неизменного расположения шин вдоль направления, перпендикулярного оси X . Таким образом, независимо от значения ψ резонатор для квази-рэлеевских волн остается расположенным параллельно резонатору для ВГБ, как показано на рис. 40. При этом угол между электродами и шинами равен углу ψ .

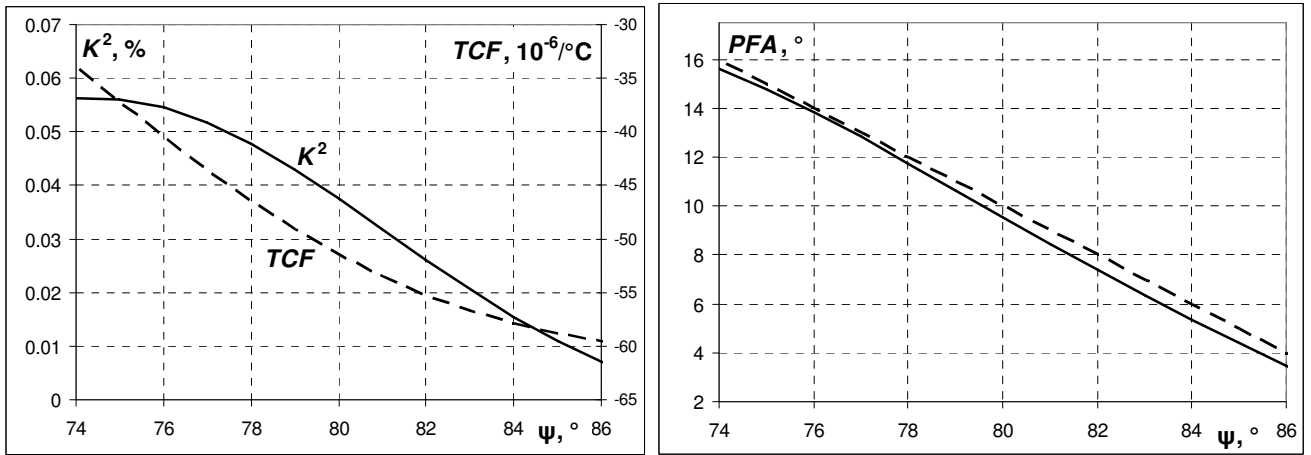


Рис.47. Зависимость расчетных значений ТКЧ TCF , КЭМС K^2 (слева) и угла отклонения потока энергии PFA (справа, сплошная линия) от третьего угла Эйлера ψ ; пунктирная линия на графике справа соответствует значениям PFA , при которых поток энергии распространяется перпендикулярно оси X

Были изготовлены резонаторы с углом между электродами и шинами, равным 76° , 78° , 80° , 82° и 84° . На рисунке 48 приведены графики зависимости добротности и максимальной проводимости $\text{Re}(Y_r)$ (проводимости на частоте последовательного резонанса) от угла ψ . При уменьшении ψ наблюдается увеличение добротности и увеличение максимальной проводимости, большее, чем увеличение добротности. Поскольку величина $\text{Re}(Y_r)$ приблизительно пропорциональна Q и K_c , ее изменение характеризует изменение произведения $K_c Q$. При $\psi = 76^{\circ}$ значение Q примерно на 20% выше значения Q при $\psi = 80^{\circ}$, а значение $K_c Q$ выше примерно на 40% и может составлять около 2,2 (исходя из приведенной в табл. 7 оценки $K_c Q = 1,6$ для $\psi = 80^{\circ}$). При этом значение K_c выше примерно на 20%, хотя расчетное значение K^2 выше на 46%. Возможно, меньшее ожидаемого увеличение K_c связано с уменьшением соотношения между K_{eff}^2 и K^2 , которое при $\psi = 80^{\circ}$ является нетипично высоким для квази-рэлеевских волн (табл. 6). Но также возможно, что значение K_c может быть еще увеличено при оптимизации конструкции резонатора под параметры, соответствующие меньшему значению ψ ; в этом случае существует потенциал роста значения $K_c Q$ еще примерно на 20%.

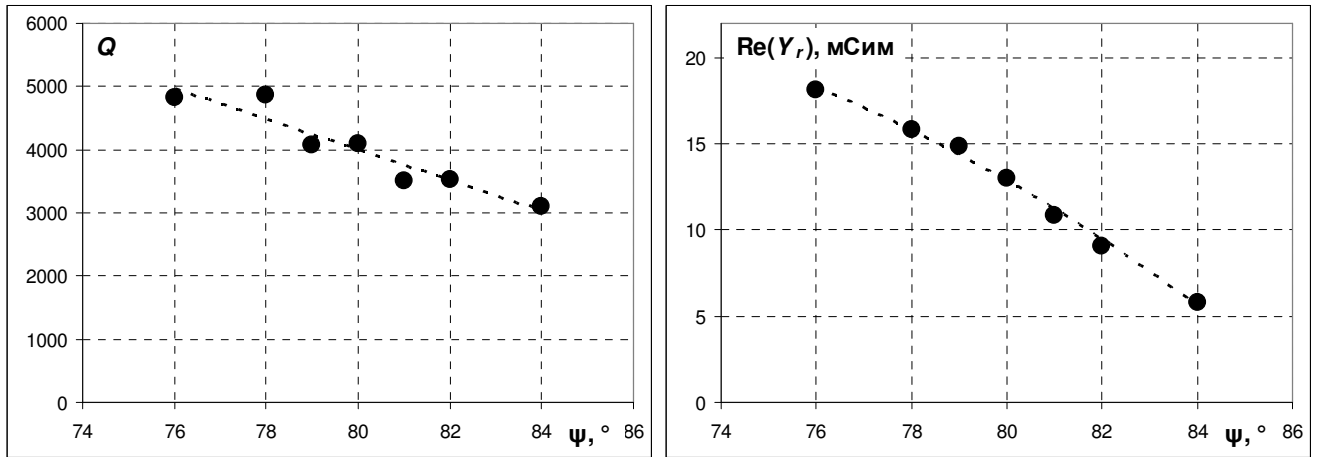


Рис. 48. Зависимость измеренных значений добротности Q (слева) и проводимости на последовательном резонансе $\text{Re}(Y_r)$ (справа) от третьего угла Эйлера ψ

Эксперимент также подтверждает снижение ТКЧ резонатора при уменьшении значения ψ . В диапазоне температуры от 10°C до 60°C ТКЧ изменяется от приблизительно $-58 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при $\psi = 84^\circ$ до приблизительно $-38 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при $\psi = 76^\circ$, что находится в соответствии с расчетной зависимостью (рис. 47). Значение Δ_{TCF} в последнем случае составляет около $-120 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что все еще заметно превышает значения Δ_{TCF} , получаемые у других пар резонаторов. Полученные результаты показывают возможность при использовании подложки из 70°Y -среза кварца выбора компромисса между значениями Δ_{TCF} и η , наиболее подходящего под требования к конкретному датчику, посредством выбора наклона электродов резонатора, в котором используется квази-рэлеевская волна. Оптимизация конструкции данной пары резонаторов, включающая в себя выбор угла наклона электродов, а также выбор размера ОР и взаимного расположения резонаторов, обсуждается в [A18].

4.7. Резонаторы на подложках из лангасита для высокотемпературных датчиков

Наиболее распространенная подложка из лангасита (с ориентацией $(0, 138,5^\circ, 26,6^\circ)$) отличается от большинства наиболее широко применяемых пьезоэлектрических подложек наличием естественной однонаправленности. Естественная однонаправленность заключается в том, что симметричный ВШП излучает в разные стороны ПАВ с разной амплитудой. Это явление обусловлено фазой коэффициента отражения ПАВ от электродов и наблюдается при наличии мнимой части у параметра k_{12} . Хотя в общем случае фаза k_{12} произвольна, ориентация большинства широко применяемых подложек связана с элементами симметрии кристалла

таким образом, что k_{12} оказывается действительным. К подложкам, используемым в датчиках, предъявляются специфические требования. Поэтому для этих целей часто выбираются подложки с иной ориентацией, в том числе подложки обладающие естественной однонаправленностью.

Подложка из лангасита с ориентацией $(0, 138,5^\circ, 26,6^\circ)$ представляет интерес для экспериментальной проверки методов проектирования резонаторов при произвольной фазе коэффициента отражения ПАВ от электродов. Результаты измерения характеристик резонаторов с электродами из алюминия и меди приведены в публикациях [A10, A11], посвященных проектированию таких резонаторов. В работе [A19] предлагается более сложная конструкция резонаторов, в которой используется ВШП, состоящий из секций с различным шагом электродов. На рисунке 49 приведены экспериментальные и расчетные характеристики резонаторов на ПАВ с алюминиевыми электродами различной толщины. На вставке приведены графики в более широком диапазоне частот и в меньшем диапазоне проводимости, позволяющие в деталях видеть побочные пики проводимости. Измерения проведены при комнатной температуре, а потенциально эта подложка может использоваться для чувствительного элемента датчика температуры, работающего в диапазоне температур, нижняя граница которого превышает комнатную температуру (вблизи которой ТКЧ резонаторов на этой подложке меняет знак). Верхняя граница диапазона практически определяется материалом электродов (собственно лангасит сохраняет работоспособность и при температурах более 1000°C). Для использования датчика при температурах, превышающих $300..450^\circ\text{C}$ требуются электроды из более тугоплавкого материала.

Проведенный расчет основных параметров ПАВ при комнатной температуре использовался для предварительного выбора подложек из лангасита для датчика температуры, работающего в диапазоне от комнатной температуры до 700°C [A14]. В этом диапазоне температур проведены измерения характеристик резонаторов, изготовленных на подложках с ориентацией $(0^\circ, 138,5^\circ, 26,6^\circ)$, $(0^\circ, 90^\circ, 32^\circ)$, $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$, $(0^\circ, 22^\circ, 90^\circ)$ и $(0^\circ, 22^\circ, 31,5^\circ)$. Изготовление резонаторов и измерение их характеристик было проведено в ОАО «Фомос-Материалс» (Москва). При изготовлении резонаторов использовались различные материалы электродов, сохраняющие работоспособность при высоких температурах: вольфрам, платина и иридий. На рисунке 50 приведены графики температурной зависимости относительного изменения частоты, при которой модуль параметра S_{11} достигает минимума (при подключении резонатора к пятидесятиомному тракту), δf для резонаторов с электродами из иридия на подложках с различной ориентацией. Для резонаторов, изготовленных на подложках с ориентацией $(0^\circ, 138,5^\circ, 26,6^\circ)$, $(0^\circ, 90^\circ, 32^\circ)$ и $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$, $h_{IDT} = 100$ нм, $h_n = 0,76$ %. Для

резонаторов, изготовленных на подложках с ориентацией $(0^\circ, 22^\circ, 90^\circ)$ и $(0^\circ, 22^\circ, 31.5^\circ)$, $h_{IDT} = 120$ нм, $h_n = 0,9$ %.

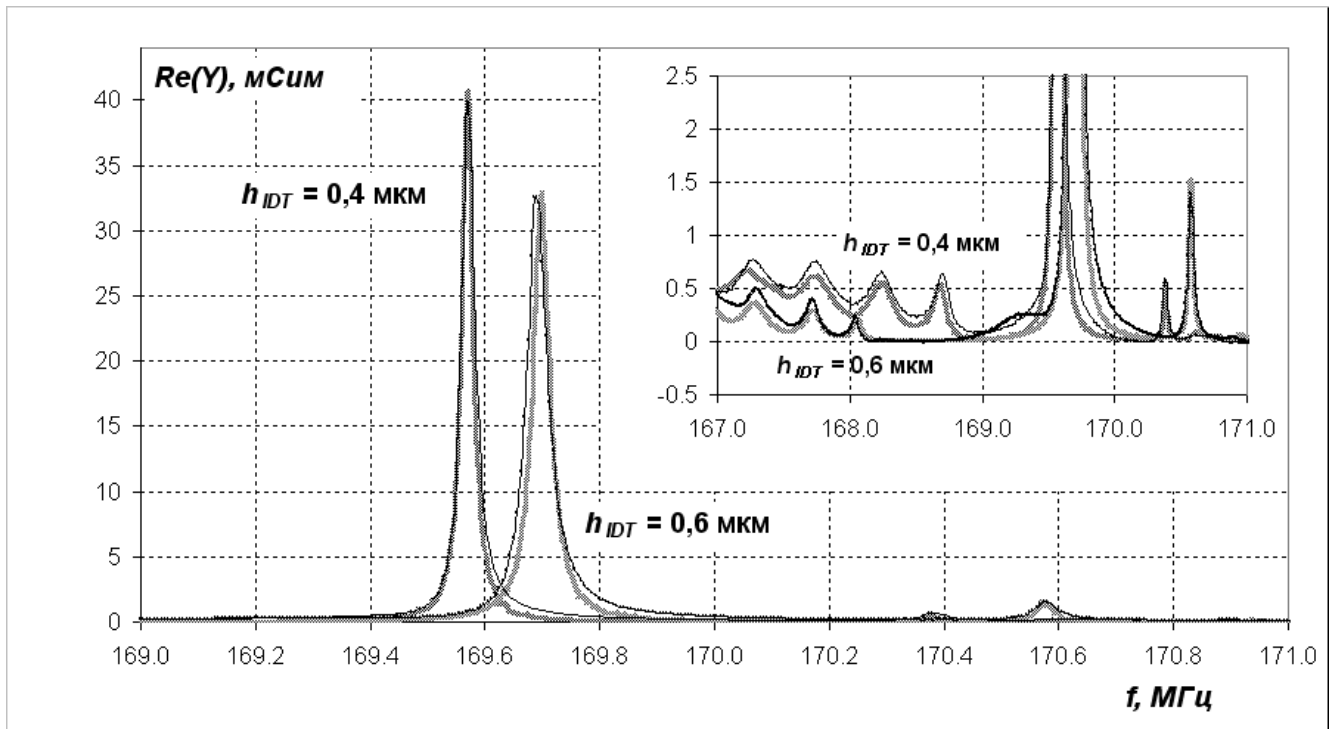


Рис. 49. Расчетная (толстые серые линии) и измеренная (тонкие черные линии) зависимость действительной части адмиттанса Y резонаторов на подложке из лангасита с ориентацией $(0, 138,5^\circ, 26,6^\circ)$ от частоты f для двух значений толщины электродов h_{IDT}

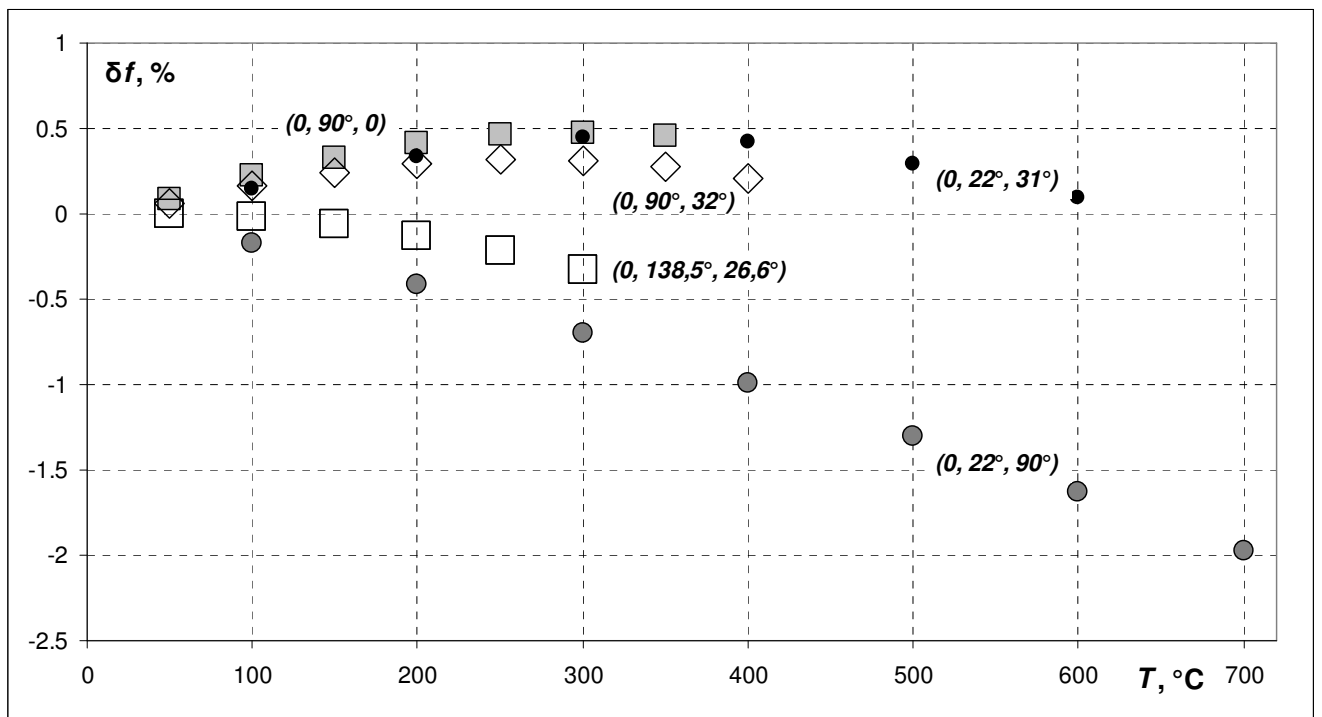


Рис. 50. Зависимость относительного изменения частоты, на которой модуль параметра S_{11} достигает минимума (при подключении резонатора к пятидесятиомному тракту), δf от температуры T для резонаторов на подложках из лангасита

Результаты экспериментального исследования воздействия температуры 650°C в течение 1000 часов на резонаторы с электродами из иридия и из платины с подслоем титана (из двухслойной пленки) приведены в [A1, A12]. Резонаторы были изготовлены на $Y-X$ -срезу лангасита (углы Эйлера $(0^{\circ}, 90^{\circ}, 0^{\circ})$). Проведено сравнение резонаторов с электродами из пленки Pt/Ti, покрытыми слоем оксида алюминия Al_2O_3 , и резонаторов с такими же электродами без защитного слоя. Этот эксперимент показал, что при наличии слоя Al_2O_3 электроды меньше повреждаются от длительного нагрева. Метод нанесения диэлектрических пленок (в том числе пленки Al_2O_3), предусматривающий измерением параметров устройства на ПАВ, на которое они наносится, непосредственно в процессе их нанесения, описан в статье [A17]. Этот метод расширяет возможности контроля параметров наносимого покрытия и может применяться для нанесения защитного слоя на чувствительные элементы высокотемпературных датчиков. Характеристики резонаторов с электродами из пленки Ir и с электродами из пленки Pt/Ti с покрытием из Al_2O_3 в течение первых 100..200 часов нагрева изменяются значительно сильнее, чем при последующем нагреве. Таким образом, предварительный отжиг этих устройств позволяет повысить стабильность их характеристик при эксплуатации.

Резонаторы с электродами из иридия на подложке с ориентацией $(0^{\circ}, 138,5^{\circ}, 26,6^{\circ})$ подробно обсуждаются в [A13]. В результате сравнения различных способов изготовления пленки Ir и формирования электродной структуры выбрано магнетронное напыление пленки в сочетании с формированием электродов ионным травлением. На рисунке 51 приведены экспериментальные и расчетные характеристики резонаторов на ПАВ с электродами из иридия с $h_{\text{IDT}} = 500$ нм, $h_n = 8\%$. Обнаружено, что в результате отжига при температуре до 550°C сопротивление электродов уменьшается в 1,5..2 раза, что приводит к существенному увеличению добротности резонаторов. Резонатор, характеристики которого приведены на рис. 51, находился при температуре 500°C в течение 30 мин. Как видно на рисунке, после отжига проводимость на резонансной частоте выросла более, чем вдвое, а относительный уровень побочных пиков понизился. Добротность резонатора при этом выросла с 700 до 3800 (более, чем в 5 раз). Результаты экспериментов показали возможность практического применения резонаторов на подложках из лангасита с электродами из иридия в качестве чувствительных элементов высокотемпературных датчиков. Предварительный отжиг таких резонаторов позволяет улучшить и стабилизировать их параметры.

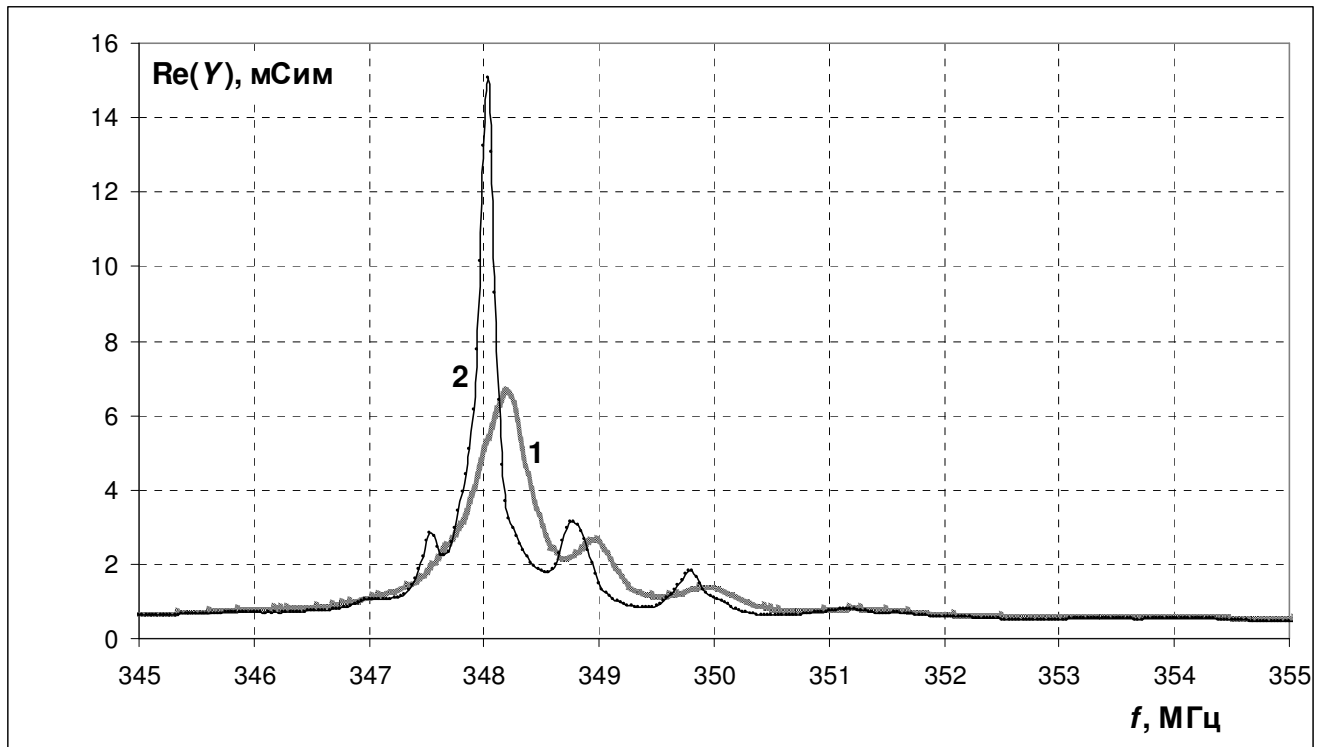


Рис. 51. Зависимость действительной части адмиттанса Y от частоты f резонатора на срезе лангасита с ориентацией $(0, 138,5^\circ, 26,6^\circ)$ с электродами из иридия толщиной $h_{IDT} = 500$ нм; 1 – до отжига, 2 – после отжига

4.8. Выводы по главе 4

В данной главе описаны результаты измерения параметров резонаторов, изготовленных на нескольких подложках из кварца, в том числе на впервые предложенных для использования подложках с наиболее высокими значениями разности значений ТКЧ пары резонаторов, изготовленных на одной подложке. Измерение ТКЧ этих резонаторов позволило проверить достоверность результатов расчета, представленных в предыдущей главе. Данный эксперимент также подтвердил возможность изготовления резонаторов с приемлемыми характеристиками на некоторых подложках, которые могут представлять интерес для практического использования в датчиках температуры.

1. Сравнение расчетных и экспериментальных значений ТКЧ показало, что результаты расчета позволяют определить области ориентаций подложек с определенным значением ТКЧ. Для точного определения подходящей ориентации требуется уточненный расчет или экспериментальный подбор. Анализ различия расчетных и экспериментальных значений ТКЧ выявил параметры ПАВ и электродных структур, величина которых

позволяет определять случаи, в которых отклонение расчетных данных от экспериментальных может быть больше типичных значений.

2. Наибольший практический интерес для получения максимальной разницы ТКЧ представляет резонатор, в котором используется ВГБ, распространяющаяся на $70^\circ Y$ -срезе (ориентация подложки $(0, 160^\circ, 90^\circ)$). Измеренное значение T_{CF} этих резонаторов превышает $80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что подтверждает возможность получения разницы ТКЧ более $170 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при размещении пары резонаторов на двух разных подложках (в сочетании с резонаторами на подложках из ниобата лития, у которых, как известно, возможны значения T_{CF} ниже $-90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). Экспериментальные частотные характеристики данных резонаторов подтверждают возможность изготовления на этой подложке резонаторов с приемлемой характеристикой: получены приемлемая добротность, приемлемый уровень побочных пиков проводимости и значение K_c , близкое к расчетному. Произведение $K_c Q$, полученное у этого резонатора, позволяет получить близкую к максимальной эффективность переизлучения датчиком энергии опрашивающего сигнала.
3. При использовании $70^\circ Y$ -среза также может быть получена близкая к максимально возможной разнице ТКЧ при размещении пары резонаторов на единой подложке. Экспериментально подтверждена возможность получения значения ΔT_{CF} превышающего $130 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. В качестве второго резонатора пары при этом применяется резонатор, в котором используется квази-рэлеевская волна, распространяющаяся под небольшим углом к направлению распространения ВГБ (на данном срезе зависимость угла отклонения потока энергии от направления распространения ПАВ такова, что резонаторы оказываются расположенными строго параллельно). Данное обстоятельство позволяет разместить пару резонаторов на минимально возможной площади, что делает этот и близкие к нему срезы еще более привлекательными для изготовления пары резонаторов на единой подложке. У этого резонатора также получены приемлемые добротность и уровень побочных пиков проводимости, однако произведение $K_c Q$ без дополнительных согласующих элементов позволяет достичь значений η только существенно меньших максимально возможного. Экспериментально подтверждена возможность получения более высоких значений $K_c Q$ за счет снижения абсолютной величины ТКЧ (и, соответственно, снижения значения ΔT_{CF}) при изменении угла наклона электродов данного резонатора. Пара резонаторов на $70^\circ Y$ -срезе с использованием ВГБ была применена в АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург) при выполнении ОКР «Нерв» для создания опрашиваемых электромагнитными волнами пассивных датчиков температуры, имплантируемых в живую ткань. Такие датчики для медицинских и

биологических применений опрашиваемые радиосигналом в диапазоне 900..930 МГц позволяют измерять температуру с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $30..45^{\circ}\text{C}$.

4. С учетом подтверждения расчетных параметров для наиболее интересного с практической точки зрения 70°Y -среза эксперименты с остальными срезами рассматриваются в первую очередь как средство для проверки достоверности результатов расчета. Вместе с тем на большей их части получены приемлемые параметры резонаторов и, следовательно, они могут быть использованы для изготовления на единой подложке пары резонаторов с определенным значением Δ_{TCF} , хотя расчет предсказывает наличие подложек, позволяющих получить такие же значения Δ_{TCF} в сочетании с более высокими значениями КЭМС. Преимуществом описанных подложек является экспериментальная проверка получения данных значений Δ_{TCF} и получения работоспособных резонаторов с приведенными описаниями их конструкции. Две из рассмотренных подложек (Y-срез и X-срез) являются массово производимыми, что также является некоторым преимуществом.
5. Результаты эксперимента с резонаторами на различных подложках также позволили определить уровень значений добротности, получаемой у резонаторов на ПАВ на подложках из кварца при рабочих частотах около 900 МГц. При отсутствии дополнительной доработки конструкции для достижения максимально возможной добротности, высокими значениями можно считать значения около 6000. Как показали результаты измерений, высокие значения добротности могут быть получены при различных значениях параметров ПАВ (в том числе при PFA около 10° и значениях γ от $-4,8$ до $2,6$). При таких значениях добротности, значения K_cQ во многих случаях не позволяют получить максимальную эффективность переизлучения энергии без дополнительных согласующих элементов, следовательно, описанный в предыдущей главе выбор подложек, позволяющих получить сочетание определенных значений ТКЧ с наибольшими значениями КЭМС, является актуальным для практических применений.
6. Экспериментально подтверждено сохранение работоспособности резонаторов на подложках из лангасита с электродами из платины или иридия при долговременном воздействии температур до 650°C . Проведенный расчет основных параметров ПАВ, распространяющихся на подложках из лангасита, использовался в ОАО «Фомос-Материалс» при выполнении ОКР «Беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах для контроля физических параметров в широком диапазоне температур» для выбора подложек для датчика температуры, работающего в диапазоне от комнатной температуры до 700°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ относящихся к теме диссертации публикаций, представленный в первой главе, показал, что датчики, в которых используются резонаторы на ПАВ, изучены в меньшей степени, чем датчики, в которых используются ЛЗ. Вместе с тем датчики с резонаторами позволяют получить меньший размер чувствительного элемента (при одинаковых дальности и точности измерений), что является важным преимуществом для части применений. В частности, высокие требования к миниатюрности датчика предъявляются в области биомедицинских применений. Среди малоизученных вопросов, касающихся датчиков с резонаторами на ПАВ, одним из наиболее актуальных является вопрос согласования резонатора с радиотехническим трактом для получения максимальной энергии отклика резонатора (главным образом интерес представляет опрос датчика импульсным сигналом). Другим наиболее актуальным вопросом является вопрос выбора подложек из пьезоэлектрических материалов для получения резонаторов с определенными значениями ТКЧ (главным образом интерес представляет получение пары резонаторов с максимально отличающимися значениями ТКЧ, желательно имеющими разный знак). Именно эти вопросы и нашли отражение в данной работе.

Во второй главе проведено теоретическое исследование эффективности переизлучения энергии датчиком при его импульсном опросе в зависимости от параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта. Использование для описания резонатора на ПАВ колебательного контура позволило получить обобщающие выводы об основных тенденциях влияния параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта на эффективность переизлучения энергии, а численный расчет характеристик резонатора на ПАВ методом связанных мод позволил проверить применимость данной модели к резонаторам с характеристиками, требуемыми для практического использования. Подробно рассмотрен случай чисто активного входного сопротивления радиотехнического тракта; реактивная часть входного сопротивления тракта, а также наличие дополнительных элементов может быть учтено в виде поправок к значениям коэффициента связи и добротности резонатора.

В работе показано, что энергию переизлученного датчиком сигнала удобно представлять в виде произведения максимально возможной накопленной в резонаторе энергии W_{lim} (достигаемой при согласовании импедансов радиотехнического тракта и резонатора) и показателя эффективности переизлучения энергии η . Зависимость η от параметров резонатора и радиотехнического тракта при оптимальной частоте опрашивающего сигнала (при которой запасаемая в датчике энергия максимальна) сводится к зависимости от двух величин:

произведения $K_c Q$ и нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта $R_n = \frac{R_A}{rK_c Q}$. Значения η не превышают величину $\eta_{\max} \approx 60\%$. Если $K_c Q \geq 4$, то η достигает η_{\max} при двух значениях R_A ; если $K_c Q < 4$, то $\eta < \eta_{\max}$ при всех значениях R_A . Вместе с тем значение W_{lim} прямо пропорционально добротности Q . Таким образом, для достижения максимальной энергии переизлученного сигнала на основании результатов данной работы рекомендуется использовать резонаторы с произведением $K_c Q$, близким к 4, или более, а также с как можно большим значением Q . Показано, что при $K_c Q \geq 4$ максимальное значение η не изменяется при увеличении K_c (в этом случае не имеет смысла использовать дополнительные согласующие элементы для увеличения K_c). Максимальное значение η при $K_c Q < 4$ монотонно возрастает с ростом $K_c Q$, поэтому в случае невозможности получения $K_c Q \geq 4$ рекомендуется использовать резонаторы с как можно большим значением $K_c Q$; получающийся при этом проигрыш в значении η можно оценить, используя полученное в данной работе выражение.

В работе показано, что значения оптимального нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта (при которых достигается максимальное значение η) зависят от произведения $K_c Q$. В случае $K_c Q \gg 4$ рекомендуется использовать радиотехнический тракт и резонатор, у которых либо $R_A \approx 2r$, либо $R_A \approx \frac{R}{2}$. В первом случае частота свободных колебаний и оптимальная частота опрашивающего сигнала близки к частоте последовательного резонанса, во втором случае они близки к частоте параллельного резонанса. В случае $K_c Q \leq 4$ рекомендуется использовать радиотехнический тракт и резонатор, у которых $R_A = \sqrt{rR}$, при этом частота свободных колебаний и оптимальная частота опрашивающего сигнала близки к величине $\frac{f_r + f_a}{2}$. В общем случае соотношение входного сопротивления радиотехнического тракта и параметров резонатора рекомендуется выбирать в соответствии с полученным в данной работе выражением. Для достижения определенного значения η в некотором диапазоне значений R_n рекомендуется выбирать резонатор со значением $K_c Q$, находящемся в определенном диапазоне, зависящем от требований к величине η и диапазону R_n .

В третьей главе проведено теоретическое исследование зависимости наиболее важных радиотехнических параметров резонатора на ПАВ (применительно к его использованию в беспроводном датчике температуры) от ориентации подложек, изготавливаемых из четырех наиболее распространенных пьезоэлектрических материалов. Анализ взаимосвязи характеристик ПАВ и параметров резонаторов показывает, что K_c резонатора главным образом определяется КЭМС ПАВ, а ТКЧ резонатора главным образом определяется ТКЗ ПАВ. На основании расчета этих параметров для всех невытекающих ПАВ, распространяющихся на

подложках со всеми возможными ориентациями, составлены рекомендации по выбору подложек для резонаторов. Практически получаемые значения добротности резонатора Q существенно меньше максимально возможных значений, определяемых вязкостью материала подложки. При этом приемлемые значения Q могут быть получены при различных значениях параметров ПАВ (в частности при различных значениях угла отклонения потока энергии и параметра дифракции).

Для достижения максимальной разности ТКЧ пары резонаторов на единой подложке рекомендуется использовать подложки из кварца, ориентация которых находится в диапазоне от $60^\circ Y$ -среза до $85^\circ Y$ -среза. Для резонатора с положительным ТКЧ на этих срезах рекомендуется использовать ВГБ (ТКЗ которой согласно расчету достигает $-90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). Для резонатора с отрицательным ТКЧ на этих срезах рекомендуется использовать квази-рэлеевскую ПАВ, распространяющуюся под углом от 75° до 90° к оси X . Согласно расчету при изменении требований к минимальной величине K^2 от 0 до 0,07% максимальное значение ТКЗ изменяется от $60 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $15 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, а максимальное значение Δ_{TCF} изменяется от $150 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ до $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Дополнительным преимуществом данных подложек является малое значение угла между направлениями распространения ПАВ с низким и высоким ТКЗ, что позволяет располагать два резонатора под малым углом относительно друг друга и, соответственно, использовать для размещения пары резонаторов минимальную площадь подложки. На основании проведенного анализа всех срезов кварца было обнаружено, что для достижения максимальной разности ТКЧ пары резонаторов на двух разных подложках рекомендуется использовать ВГБ на $70^\circ Y$ -срезе кварца (подложка с ориентацией $(0, 160^\circ, 90^\circ)$) или близких к нему срезах в сочетании с подложкой из ниобата лития, ориентация которой находится в диапазоне от $(0, 70^\circ, 90^\circ)$ до $(0, 90^\circ, 90^\circ)$. Согласно расчету ТКЗ ПАВ на ниобате лития достигает $98 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, соответственно, разность ТКЧ достигает $188 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Подложки из $70^\circ Y$ -среза кварца, впервые предложенные в работе, были специально заказаны для экспериментальной проверки характеристик изготовленных на них резонаторов. Резонатор на ПАВ, в котором используется ВГБ, распространяющаяся на $70^\circ Y$ -срезе, был спроектирован, изготовлен и его характеристики были измерены. Проведенный в работе анализ экспериментальных частотных характеристик данных резонаторов подтверждает возможность изготовления резонаторов с приемлемыми значениями добротности, коэффициента связи и уровня побочных пиков проводимости. Измеренное значение ТКЧ этих резонаторов превышает $80 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что подтверждает возможность получения разницы ТКЧ более $170 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при размещении пары резонаторов на двух разных подложках (согласно опубликованным данным на подложках из ниобата лития экспериментально получены значения ТКЧ ниже $-90 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). Измеренное значение произведения $K_c Q$ данных резонаторов позволяет получить

эффективность переизлучения датчиком энергии опрашивающего сигнала, близкую к максимально возможной.

В результате проведенной работы экспериментально подтверждена возможность получения при использовании $70^\circ Y$ -среза значения Δ_{TCF} превышающего $130 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. У второго резонатора пары (в котором используется квази-рэлеевская волна, распространяющаяся под углом 80° к оси X) получены приемлемые значения добротности и уровня побочных пиков проводимости, однако произведение $K_c Q$ не позволяет достигать близких к максимально возможному значений η без использования дополнительных согласующих элементов. Экспериментально подтверждена возможность получения более высоких значений $K_c Q$ за счет снижения значения Δ_{TCF} при изменении угла наклона электродов данного резонатора. Расчетная зависимость PFA квази-рэлеевской волны от ψ при значениях ψ , близких к 80° , такова, что направление распространения потока энергии почти не зависит от ψ и практически совпадает с направлением распространения ВГБ. При этом два резонатора располагаются параллельно друг другу, что позволяет разместить пару резонаторов на минимально возможной площади. Такое расположение резонаторов возможно благодаря впервые примененному для датчика температуры совместному использованию ПАВ двух разных типов, распространяющихся в близких направлениях, но имеющих существенно различные параметры. Данные топологии пары резонаторов, предложенные в работе, ранее нигде не описывались.

Результаты вышеупомянутых экспериментов, а также экспериментов с другими подложками (их описание приведено в четвертой главе) подтверждают применимость и достоверность результатов расчета для идентификации областей ориентаций подложки для получения определенных значений ТКЧ. Для точного определения оптимальной ориентации подложки требуется уточненный расчет или ее экспериментальный подбор; это особенно актуально при больших значениях коэффициента отражения ПАВ от электродов, больших значениях соотношения $\frac{K_{eff}^2}{K^2}$ и при особенно сильной зависимости параметров ПАВ от ориентации. Как показал проведенный в данной работе анализ результатов измерений, высокие значения добротности (при рабочих частотах около 900 МГц без дополнительной доработки конструкции резонаторов высокими значениями можно считать $Q \approx 6000$) могут быть получены при различных значениях параметров ПАВ. При полученных в эксперименте значениях Q , значения $K_c Q$ во многих случаях не позволяют получить максимальную эффективность переизлучения энергии без дополнительных согласующих элементов. Поэтому проведенный в работе выбор подложек, позволяющих в реальных устройствах получить сочетание определенных значений ТКЧ с наибольшими значениями КЭМС, актуален для практического применения.

На основе анализа результатов проведенных в работе расчетов сделаны рекомендации по выбору материала и ориентации подложек для получения максимальных значений разности ТКЧ при заданном минимальном значении КЭМС (или максимальных значений КЭМС при определенных значениях разности ТКЧ). Каждый из рассмотренных материалов обладает наилучшим сочетанием этих параметров в определенном диапазоне КЭМС и разности ТКЧ. Рекомендации по выбору подложек сделаны как для изготовления пары резонаторов на единой подложке, так и для их изготовления на разных подложках.

Существуют перспективы дальнейшей разработки данной темы, заключающиеся в решении следующих задач. Оптимизация использования согласующих элементов для получения максимальной энергии переизлученного датчиком сигнала. Выработка рекомендаций по выбору подложки для измерения температуры, отличающейся от комнатной (от криогенной до 1100°C). Выработка аналогичных рекомендаций для конструирования датчиков механических величин. Поиск подложек с лучшими сочетаниями параметров ПАВ для конструирования датчиков среди подложек из менее широко используемых и новых пьезоэлектрических материалов.

Автор диссертации выражает признательность руководителю диссертационной работы к.т.н. с.н.с. С.А. Жгуну за предложенную тему и постоянное внимание к работе. Автор глубоко благодарен соавторам публикаций и коллегам за совместные исследования, публикации и помощь в работе над диссертацией. Отдельную благодарность автор выражает своим коллегам по коллективу Национального Исследовательского Университета «МЭИ», в котором выполнена диссертационная работа. Значительную помощь оказало использование в работе над диссертацией свободно распространяемого в виде исходного кода программного обеспечения, разработанного проф. К. Хашимото (университет Чиба, Япония).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Жгун, С.А. Применение поверхностных акустических волн для создания беспроводных датчиков / С.А. Жгун, А.С. Швецов, Г.Д. Лобов, Дж. Ванг // Материалы XXIV международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». – 2016. – С.366.
- A2. Патент РФ № 2537751. Чувствительный элемент на поверхностных акустических волнах для измерения температуры / И.Г. Анцев, С.В. Богословский, Г.А. Сапожников, А.С. Швецов, С.А. Жгун. – Заявка №2013111112/28, приоритет от 12.03.2013, опубл. 10.01.2015 в Бюлл. №1.
- A3. Трохимец, К.А. Пассивный беспроводной датчик температуры на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах / К.А. Трохимец, А.П.Тихонов, С.А.Жгун, А.С.Швецов // Материалы 9-й научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2014. – С.412.
- A4. Швецов, А.С. Вопросы проектирования однопортовых резонаторов на материалах с естественной однонаправленностью / А.С. Швецов, С.А. Жгун, Г.Д. Лобов, О.М. Штейнберг, Д.П. Морган // XIV международная конференция по спиновой электронике и гировекторной электродинамике. – 2005–2006. – С.344.
- A5. Швецов, А.С. Отражение поверхностных акустических волн от периодической последовательности металлических полосок / А.С. Швецов, С.А. Жгун // XII международная конференция по спиновой электронике и гировекторной электродинамике. – 2003. – С.495.
- A6. Швецов, А.С. Отражение поверхностных акустических волн от периодической последовательности металлических полосок на подложке из лангасита / А.С. Швецов, С.А. Жгун // XVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – 2010. – Т.1. – С.24.
- A7. Штейнберг, О.М. Повышение чувствительности и точности измерителя крутящего момента вращающегося вала с электромагнитной связью с датчиком на ПАВ / О.М. Штейнберг, А.С. Швецов, С.А. Жгун, Г.Д. Лобов // Метрология (приложение к журналу «Измерительная техника»). – 2007. – № 12. – С.15.
- A8. Antcev, I. Comparative analysis of the experience obtained from the use of SAW and BAW wireless resonator temperature sensors for surgery / I. Antcev, S. Bogoslovsky, G. Sapozhnikov, S. Zhgoon, A. Shvetsov // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2015. – С.1. DOI: 10.1109/ULTSYM.2015.0356

- A9. Antsev, I.G. Implantable acoustic wave sensors for surgery [Электронный ресурс] / I.G. Antsev, S.V. Bogoslovsky, G.A. Sapozhnikov, S.A. Zhgoon, A.S. Shvetsov / SAW Symposium. – 2014. – Режим доступа: <http://www.saw-symposium.com/wp-content/uploads/Implantable-acoustic-wave-sensors-for-surgery.pdf>
- A10. Morgan, D.P. One-port SAW resonators using natural SPUDT substrates / D.P. Morgan, S. Zhgoon, A. Shvetsov // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2007. – № 10. – С.1936. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.486
- A11. Morgan, D.P. One-port SAW resonators using natural SPUDT substrates / D.P. Morgan, S. Zhgoon, A. Shvetsov, E. Semenova, V. Semenov // 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2005. – С.444. DOI: 10.1109/ULTSYM.2005.1602888
- A12. Sakharov, S. Optimization of wafer orientation and electrode materials for LGS high-temperature SAW sensors / S. Sakharov, A. Zabelin, S. Kondratiev, D. Roshchupkin, D. Richter, H. Fritze, A. Shvetsov, S. Zhgoon // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2012. – С.1525. DOI: 10.1109/ULTSYM.2012.0381
- A13. Sakharov, S. Technological process and resonator design optimization of Ir/LGS High Temperature SAW Devices / S. Sakharov, A. Zabelin, A. Medvedev, O. Buzanov, S. Kondratiev, D. Roshchupkin, A. Shvetsov, S. Zhgoon // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2014. – С.377. DOI: 10.1109/ULTSYM.2014.0093
- A14. Sakharov, S. Theoretical and experimental investigation of langasite as material for wireless high temperature SAW sensors / S. Sakharov, S. Kondratiev, A. Zabelin, N. Naumenko, A. Azarov, S. Zhgoon, A. Shvetsov // 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2010. – С.535. DOI: 10.1109/ULTSYM.2010.5935533
- A15. Shvetsov, A. Choice of quartz cut for sensitive wireless SAW temperature sensor / A. Shvetsov, S. Zhgoon, I. Antsev, S. Bogoslovsky, G. Sapozhnikov, K. Trokhimets, M. Derkach // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2014. – С.1505. DOI: 10.1109/ULTSYM.2014.0372
- A16. Shvetsov, A. Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors / A. Shvetsov, S. Zhgoon, I. Antsev, S. Bogoslovsky, G. Sapozhnikov // 2016 European Frequency and Time Forum. – 2016. – С.1. DOI: 10.1109/EFTF.2016.7477825
- A17. Zhgoon, S. Monitored vacuum deposition of dielectric coatings over surface acoustic wave devices / S. Zhgoon, A. Shvetsov, K. Bhattacharjee, O. Legrani, P. Pigeat, O. Elmazria // Vacuum. – 2015. – Т.116. – С.1. DOI: 10.1016/j.vacuum.2015.02.022
- A18. Zhgoon, S. SAW temperature sensor on quartz / S. Zhgoon, A. Shvetsov, I. Antsev, S. Bogoslovsky, G. Sapozhnikov, K. Trokhimets, M. Derkach // IEEE Transactions on

Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2015. – № 6. – С.1066.

DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006840

- A19. Zhgoon, S. Single port SAW resonators design for arbitrary reflection phase / S. Zhgoon, A. Shvetsov, O. Shteynberg, D.P. Morgan, P.G. Ivanov // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2006. – С.1883. DOI: 10.1109/ULTSYM.2006.475

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Советское радио, 1964. – 695 с.
2. Гуляев, Ю.В. Поверхностные волны в твердых телах / Ю.В. Гуляев // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – № 1. – С.63.
3. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
4. Aubert, T. Extraction of COM parameters on Pt/LGS for high temperature SAW sensor / T. Aubert, F. Sarry, O. Elmazria, L. Bouvot, B. Assouar, P. Nicolay, M. Hehn // 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2008. – С.820.
5. Ballandras, S. Temperature derivatives of the fundamental elastic constants of isotropic materials / S. Ballandras, E. Gavignet, E. Bigler, E. Henry // Applied Physics Letters. – 1997. – № 12. – С.1625.
6. Ballandras, S. Wireless temperature sensor using SAW resonators for immersed and biological applications / S. Ballandras, W. Daniau, G. Martin, P. Berthelot // 2002 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 2002. – Т.1/ – С.445.
7. Bao, X.Q. SAW temperature sensor and remote reading system / X.Q. Bao, W. Burkhard, V.V.Varadan, V.K. Varadan // IEEE 1987 Ultrasonics Symposium. – 1987. – С.583.
8. Beckley, J. Non-contact torque sensors based on SAW resonators / J. Beckley, V. Kalinin, M. Lee, K. Voliansky // Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp. - 2002. - С.202.
9. Behanan, R. Thin films and techniques for SAW sensor operation above 1000°C / R. Behanan, S.C. Moulzolf, M. Call, G. Bernhardt, D. Frankel, R.J. Lad, M.P. da Cunha // 2013 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2013. – С.1013.
10. Binder, A. Wireless SAW temperature sensor system for high-speed high-voltage motors / A. Binder, R. Fachberger // IEEE Sensors Journal. – 2011. – № 4. – С.966.

11. Binder, A. Wireless surface acoustic wave pressure and temperature sensor with unique identification based on LiNbO₃ / A. Binder, G. Bruckner, N. Schobernick, D. Schmitt // IEEE Sensors Journal. – 2013. – № 5. – C.1801.
12. Blampain, E. Platinum/AlN/Sapphire SAW resonator operating in GHz range for high temperature wireless SAW sensor / E. Blampain, O. Elmazria, O. Legrani, S. McMurtry, F. Montaigne, C. Fu, K.K. Lee, S.S. Yang // 2013 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2013. – C.1081.
13. Bleustein, J.L. A new surface wave in piezoelectric materials / J.L. Bleustein // Applied Physics Letters. – 1968. – № 12. – C.412.
14. Buff, W. A differential measurement SAW device for passive remote sensing / W. Buff, M. Rusko, T. Vandahl, M. Goroll, F. Möller // 1996 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1996. – T.1. – C.343.
15. Buff, W. Remote sensor system using passive SAW sensors / W. Buff, F. Plath, O. Schmeckeber, M. Rusko, T. Vandahl, H. Luck, F. Moller, D.C. Malocha // 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1994. – T. 1. – C.585.
16. Buff, W. Universal pressure and temperature SAW sensor for wireless applications / W. Buff, M. Rusko, M. Goroll, J. Ehrenpfordt, T. Vandahl // 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1997. – T.1 – C.359.
17. Buff, W. Wireless passive remote sensing with SAW resonators and a new solution for identification problems in multiple sensor systems / W. Buff, M. Goroll, S. Klett, M. Rusko, M. Binhack, J. Ehrenpfordt, // 29th European Microwave Conference. – 1999. – T.1 – C.391.
18. Canabal, A. CDMA and FSCW surface acoustic wave temperature sensors for wireless operation at high temperatures / A. Canabal, P.M. Davulis, E. Dudzik, M. Pereira da Cunha // 2009 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2009. – C.807.
19. Canabal, A. Multi-sensor wireless interrogation of SAW resonators at high temperatures / A. Canabal, P.M. Davulis, T. Pollard, M. Pereira da Cunha // 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2010. – C.265.
20. Cherednick, V.I. Temperature sensitive cuts for temperature sensors / V.I. Cherednick, M.Yu. Dvoesherstov // 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2005. – C.1872.
21. Chin, T. Compact antennas for wireless langasite SAW sensors / T. Chin, D.W. Greve, I.J. Oppenheim // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2011. – C.826.
22. Dowling, J. RFID-enabled temperature sensing devices: a major step forward for energy efficiency in home and industrial applications? / J. Dowling, M.M. Tentzeris, N. Beckett // IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID. – 2009. – C.1.

23. Droit, C. Note: a frequency modulated wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement / C. Droit, G. Martin, S. Ballandras, J.-M. Friedt // *Review of Scientific Instruments*. – 2010. – № 5. – C.56103.
24. Dudzik, E. Wireless sensor system based on SAW coded passive devices for multiple access / E. Dudzik, A. Abedi, D. Hummels, M. Pereira da Cunha // *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*. – 2008. – C.1116.
25. Fachberger, R. Applicability of LiNbO₃, langasite and GaPO₄ in high temperature SAW sensors operating at radio frequencies / R. Fachberger, G. Bruckner, G. Knoll, R. Hauser, J. Biniash, L. Reindl // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 2004. – № 11. – C.1427.
26. Fachberger, R. Wireless SAW based high-temperature measurement systems / R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, L. Reindl // *2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. – 2006. – C.358.
27. Fachberger, R. Wireless temperature monitoring in an electrolytic galvanizing plant / R. Fachberger, C. Werner // *2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium*. – 2013. – C.251.
28. Friedt, J.-M. A wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement / J.-M. Friedt, C. Droit, G. Martin, S. Ballandras // *Review of Scientific Instruments*. – 2010. – № 1. – C. 14701.
29. Friedt, J.-M. Surface acoustic wave devices as passive buried sensors / J.-M. Friedt, T. Retornaz, S. Alzuaga, T. Baron, G. Martin, T. Laroche, S. Ballandras, M. Griselin, J.-P. Simonnet // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – № 3. – C.34905.
30. Gallagher, M.W. An integrated SAW sensor with direct write antenna / M.W. Gallagher, W.C. Smith, D.C. Malocha // *2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium*. – 2013. – C.450.
31. Gallagher, M.W. SAW multi-sensor system with temperature and range / M.W. Gallagher, D.C. Malocha // *2012 IEEE International Ultrasonics Symposium*. – 2012. – C.2106.
32. Gallagher, M.W. Wireless wideband SAW sensor - antenna design / M.W. Gallagher, B.C. Santos, D.C.Malocha // *2010 IEEE International Frequency Control Symposium*. – 2010. – C.291.
33. Gamba, P. Wireless passive sensors for remote sensing of temperature on aerospace platforms / P. Gamba, E. Goldoni, P. Savazzi, P.G. Arpesi, C. Sopranzi, J.-F. Dufour // *2013 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*. – 2013. – C.1.
34. Gopalsami, N. SAW microsensor brain implant for prediction and monitoring of seizures / N. Gopalsami, I. Osorio, S. Kulikov, S. Buyko, A. Martynov, A.C. Raptis // *IEEE Sensors Journal*. – 2007. – № 7. – C.977.

35. Grossman, R. Measurement of mechanical, quantities using quartz sensors / R. Grossman, J. Michel, T. Sachs, E. Schrufer // 1996 European Frequency and Time Forum. – 1996. – C.376.
36. Hagelauer, A. SAW and CMOS RFID transponder-based wireless systems and their applications/ A. Hagelauer, T. Ussmueller, R. Weigel // 2012 IEEE International Frequency Control Symposium. – 2012. – C.1.
37. Hamsch, M. An interrogation unit for passive wireless SAW sensors based on Fourier transform / M. Hamsch, R. Hoffmann, W. Buff, M. Binhack, S. Klett // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2004. – № 11. – C.1449.
38. Han, Y. Design of temperature sensor array in smart electric grid based on SAW resonators / Y. Han, Z. Li, Z. Qi, Y. Hu, B. Liu, T. Han, J. Wang // 2012 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAOWDA). – 2012. – C.387.
39. Hashimoto, K. Free software products for simulation and design of surface acoustic wave and surface transverse wave devices / K. Hashimoto, M. Yamaguchi // 1996 IEEE International Frequency Control Symposium. – 1996. – C.300.
40. Hashimoto, K. Surface acoustic wave devices in telecommunications: modeling and simulation / K. Hashimoto. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo: Springer, 2000. – 330 c.
41. Hauden, D. Temperature Sensor Using SAW Delay Line / D. Hauden, G. Jaillet, R. Coquerel // 1981 Ultrasonics Symposium. – 1981. – C.148.
42. Hornsteiner, J. Surface acoustic wave sensors for high-temperature applications / J. Hornsteiner, E. Born, G. Fischerauer, E. Riha // Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium. – 1998. – C.615.
43. Kalinin, V. Contactless torque and temperature sensor based on SAW resonators / V. Kalinin, G. Bown, A. Leigh // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2006. – C.1490.
44. Kalinin, V. Influence of receiver noise properties on resolution of passive wireless resonant SAW sensors / V. Kalinin // 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2005. – C.1452.
45. Kalinin, V. Modeling of a wireless SAW system for multiple parameter measurement / V. Kalinin // 2001 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2001. – C.1790.
46. Kalinin, V. Passive wireless strain and temperature sensors based on SAW devices / V. Kalinin // 2004 IEEE Radio and Wireless Conference. – 2004. – C.187.
47. Kalinin, V. Pulsed interrogation of the SAW torque sensor for electrical power assisted steering / V. Kalinin, G. Bown, J. Beckley, R. Lohr // Proc. IEEE Int. Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Control Joint 50th Anniversary Conf. – 2004. – C.1577.
48. Kalinin, V. Wireless physical SAW sensors for automotive applications/ V. Kalinin // 2011 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2011. – C.212.

49. Kovacs, G. Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃ / G. Kovacs, M. Anhorn, H.E. Engan, G. Visintini, C.C.W. Ruppel // 1990 IEEE Ultrasonics Symposium. – 1990. – C.435.
50. Kozlovski, N.Y. A 915 MHz SAW sensor correlator system / N.Y. Kozlovski, D.C. Malocha, A.R.Weeks // IEEE Sensors Journal. – 2011. – № 12. – C.3426.
51. Kozlovski, N.Y. Multi-track low-loss SAW tags with flexible impedance matching for passive wireless sensor applications / N.Y. Kozlovski, D.C. Malocha // 2010 IEEE International Frequency Control Symposium. – 2010. – C.279.
52. Kuypers, J.H. Passive 2.45 GHz TDMA based multi-sensor wireless temperature monitoring system: results and design considerations / J.H. Kuypers, S. Tanaka, M. Esashi, D.A. Eisele, L.M.Reindl // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2006. – C.1453.
53. Lamothe, M. Temperature measurements with ultra-wideband SAW sensors / M. Lamothe, V. Plessky // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2012. – C.2089.
54. Lamothe, M. Ultra-wide-band SAW sensors and tags / M. Lamothe, V. Plessky, T. Ostertag, J.-M. Friedt, S. Ballandras // 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium. – 2013. – C.454.
55. Lardat, R. Micro-machined, all quartz package, passive wireless SAW pressure and temperature sensor / R. Lardat, L. Penavaire, P. Menage, L. Chommeloux, H. Huet, C. Lestrat, T. Pastureauud, F. Haon, W. Steichen, S. Ballandras, G. Heider // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2006. – C.1441.
56. Legrani, O. Packageless temperature sensor based on AlN/IDT/ZnO/Silicon layered structure / O. Legrani, O. Elmazria, M. Elhosni, A. BartasYTE, P. Pigeat, S. Zghoon // 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium. – 2013. – C.259.
57. Li, F. Wireless surface acoustic wave radio frequency identification (SAW-RFID) sensor system for temperature and strain measurements / F. Li, D. Xiang, S. Chiang, B.R. Tittmann, C. Searfass // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2011. – C.822.
58. Liu, B. Error correction method for passive and wireless resonant SAW temperature sensor / B. Liu, T. Han, C. Zhang // IEEE Sensors Journal. – 2015. – № 6. – C.3608.
59. Liu, W. SAW temperature sensors system for smart electric grid / W. Liu, B. Tan, Y. Gong // 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2010. – C.756.
60. Ma, W. Temperature-sensitive cuts for surface acoustic waves in quartz / W. Ma, W. Shi // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2001. – № 1. – C.333.
61. Malocha, D.C. Orthogonal frequency coded SAW sensors and RFID design principles / D.C. Malocha, J. Pavlina, D. Gallagher, N. Kozlovski, B. Fisher, N. Saldanha, D. Puccio // 2008 IEEE International Frequency Control Symposium. – 2008. – C. 278.
62. Malocha, D.C. SAW reflective delay line multi-transit analysis / D.C.Malocha // 2016 IEEE International Frequency Control Symposium. – 2016.

63. Martin, G. Measuring the inner body temperature using a wireless temperature SAW-sensor-based system / G. Martin, P. Berthelot, J. Masson, W. Daniau, V. Blondeau-Patissier, B. Guichardaz, S. Ballandras, A. Lamber // 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2005. – C.2089.
64. Müller, A. Sezawa propagation mode in GaN on Si surface acoustic wave type temperature sensor structures operating at GHz frequencies / A. Müller, I. Giangu, A. Stavrinidis, A. Stefanescu, G. Stavrinidis, A. Dinescu, G. Konstantinidis // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – № 12. – C.1299.
65. Ostermayer, G. Multiple access to SAW sensors using matched filter properties / G. Ostermayer, A. Pohl, L. Reindl, F. Seifert // 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1997. – T.1. – C.339.
66. Pavlina, J.M. SAW wireless, passive sensor spread spectrum platforms / J.M. Pavlina, B. Santos, N. Kozlovski, D.C. Malocha // 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2008. – C. 1112.
67. Pereira da Cunha, M. Langasite 2.45 GHz ISM band SAW resonator for harsh environment wireless applications / M. Pereira da Cunha, A. Maskai, R.J. Lad, T. Coyle, G. Harka // 2016 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 2016.
68. Pereira da Cunha, M. Wireless acoustic wave sensors and systems for harsh environment applications / M. Pereira da Cunha, R.J. Lad, P. Davulis, A. Canabal, T. Moonlight, S. Moulzolf, D.J. Frankel, T. Pollard, D. McCann, E. Dudzik, A. Abedi, D. Hummels, G. Bernhardt // 2011 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor. – 2011. – C.41.
69. Plum, T. Piston temperature measurement with SAW sensors / T. Plum, S. Tourette, M.Loschonsky, M. Robel // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. – 2011. – C.1.
70. Pohl, A. A low-cost high-definition wireless sensor system utilizing intersymbol interference / A. Pohl // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 1998. – №5. – C.1355.
71. Pohl, A. Radio signals for SAW ID tags and sensors in strong electromagnetic interference / A. Pohl, F. Seifert, L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, W. Pietsch // 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1994. – T.1. – C.195.
72. Pohl, A. Wavelet transform with a SAW convolver for sensor application / A. Pohl, G. Ostermayer, C. Hausleitner, F. Seifert, L. Reindl // 1995 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1995. – T.1. – C.143.
73. Pohl, A. Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q SAW resonators / A. Pohl, G. Ostermayer, F. Seifert // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 1998. – № 5. – C.1161.

74. Puccio, D. Orthogonal frequency coding for SAW tagging and sensors / D. Puccio, D.C. Malocha, N. Saldanha, D.R. Gallagher, J.H. Hines // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2006. – № 2. – C.377.
75. Razi, A. Interference reduction in wireless passive sensor networks using directional antennas / A. Razi, A. Abedi // 4th Fly by Wireless Workshop. – 2011. – C.1.
76. Reindl, L. Chirped SAW devices for wireless passive sensors / L. Reindl, U. Rösler, C.C.W. Ruppel, R. Obertreis, R. Weigel // 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1997. – T.1. – C.343.
77. Reindl, L. SAW devices as wireless passive sensors / L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, C.C.W. Ruppel, W.-E. Bulst, F. Seifert // 1996 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1996. – T.1 – C.363.
78. Reindl, L. Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors / L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, H. Scherr, U. Wolff, F. Schmidt // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 1998. – № 5. – C.1281.
79. Reindl, L. Wireless measurement of temperature using surface acoustic waves sensors/ L. Reindl, I. Shrena // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2004. – № 11. – C.1457.
80. Rusko, M. Passive resonator identification tag for narrow-band wireless telemetry / M. Rusko, W. Buff, M. Binhack, M. Goroll, J. Ehrenpfordt, S. Klett // 1999 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1999. – T. 1. – C.377.
81. Sakharov, S. Characterization of langasite for application in high temperature SAW sensors / S. Sakharov, N. Naumenko, A. Zabelin, S. Zhgoon // 2011 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2011. – C.2289.
82. Sakharov, S. New data on temperature stability acoustical losses of langasite crystals / S. Sakharov, P. Senushencov, A. Medvedev, Yu. Pisarevsky // 1995 IEEE International Frequency Control Symposium. – 1995. – C.647.
83. Saldanha, N. Pseudo-orthogonal frequency coded wireless SAW RFID temperature sensor tags / N. Saldanha, D.C. Malocha // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2012. – № 8. – C.1750.
84. Schimetta, G. Wireless pressure and temperature measurement using a SAW hybrid sensor / G. Schimetta, F. Dollinger, G. Scholl, R. Weigel // 2000 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 2000. – T. 1. – C.445.
85. Schmidt, F. Remote sensing of physical parameters by means of passive surface acoustic wave devices ("ID-TAG") / F. Schmidt, O. Sczesny, L. Reindl, V. Magori // 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1994. – T.1. – C.589.

86. Scholl, G. SAW-based radio sensor systems for short-range applications / G. Scholl, C. Korden, E. Riha, C.C.W. Ruppel, U. Wolff, G. Riha, L. Reindl, R. Weigel // IEEE Microwave Magazine. – 2003. – № 4. – C.68.
87. Scholl, G. Wireless passive SAW sensor systems for industrial and domestic applications / F. Schmidt, T. Ostertag, L. Reindl, H. Scherr, U. Wolff // Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium. – 1998. – C.595.
88. Scholz, P. Low-cost transceiver unit for SAW-sensors using customized hardware components / P. Scholz, M. Dierkes, U. Hilleringmann // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2006. – C.953.
89. Schuster, S. Performance evaluation of algorithms for SAW-based temperature measurement / S. Schuster, S. Scheiblhofer, L. Reindl, A. Stelzer // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2006. – № 6. – C.1177.
90. Shimizu, Y. SAW propagation characteristics of complete cut of quartz and new cuts with zero temperature coefficient of delay / Y. Shimizu, Y. Yamamoto // 1980 IEEE Ultrasonics Symposium. – 1980. – C.420.
91. Smith, R.T. Temperature dependence of the elastic, piezoelectric and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate / R.T.Smith, F.S.Welsh // Journal of Applied Physics. – 1971. – № 6. – C.2219.
92. Soluch, W. Properties of SAW synchronous two-port resonators on $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ crystal / W. Soluch // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2011. – № 2. – C.485.
93. Tsai, C. Doping effects of CuO additives on the properties of low-temperature-sintered PMnN-PZT-based piezoelectric ceramics and their applications on surface acoustic wave devices / C. Tsai, S. Chu, C. Lu // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2009. – № 3. – C.660.
94. Vandahl, T. New SAW sensor-device with identification capability / T. Vandahl, M. Rusko, F. Moller, W. Buff // 1995 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1995. – T. 1. – C.535.
95. Weigel, R. A fast and precise six-port-based IFM technique for wireless resonant SAW sensing / R. Weigel, F. Lurz, S. Lindner, S. Mann, S. Linz, A. Koelpin // 2016 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 2016.
96. Weld, C.E. Temperature measurement using surface skimming bulk waves / C.E. Weld, J.D. Sternhagen, R.D. Mileham, K.D. Mitzner, D.W. Galipeau // 1999 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1999. – T.1. – C.441.
97. Wolff, U. Radio accessible SAW sensors for non-contact measurement of torque and temperature / U. Wolff, F. Schmidt, G. Scholl, V. Magori // 1996 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1996. – T.1. – C.359.

98. Wong, G. Characterization of materials for the design of wireless SAW sensors in a high temperature environment / G. Wong, T. Baron, L. Arapan, B. Dulmet, J.-M. Lesage // 2016 IEEE International Frequency Control Symposium. – 2016.
99. Yudytskiy, M. Continuous temperature monitoring algorithm for SAW sensors / M. Yudytskiy, R. Fachberger // 2015 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. – 2015.
100. Zheng, P. Pulse-mode temperature sensing with langasite SAW devices / P. Zheng, T.-L. Chin, D.W. Greve, I.J. Oppenheim, L. Cao // 2010 IEEE International Frequency Control Symposium. – 2010. – C.297.
101. Zheng, P. Langasite SAW temperature and oxygen multi-sensor / P. Zheng, D.W. Greve, I.J. Oppenheim, V. Malone // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. – 2011. – C.1.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Акты об использовании результатов диссертации



Акционерное общество
«Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

197375, Россия, Санкт-Петербург
ул. Новосельковская, д. 37, лит. А
тел.: +7 (812) 777-50-51
факс: +7 (812) 600-04-49
e-mail: radar@radar-mms.com
www.radar-mms.com

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
директора – генерального
конструктора по инновациям



Сапожников Г.А.

2016 г.

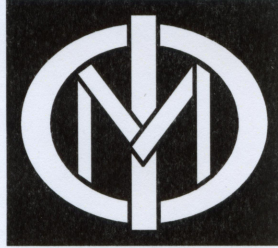
АКТ

внедрения результатов, полученных Швецовым А. С. в процессе выполнения диссертационной работы «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Настоящим актом подтверждается, что в период 2009-2014 гг. АО «НПП «Радар ммс» при непосредственном участии Швецова А.С. в рамках ОКР «Нерв» (государственный контракт № 12411.1006899.11.074 от 14.05.2012 г.) использованы основные результаты и предложения диссертационной работы: выбор срезов кварца для достижения максимально возможной чувствительности беспроводного пассивного датчика температуры для имплантации в живые организмы и рекомендации по выбору соотношения между сопротивлением антенны и параметрами резонатора на ПАВ при импульсном опросе.

Заместитель директора НПК ММСН,
д.т.н., проф.

Богословский С.В.



ОАО «Фомос-Материалс»

107023 Москва ул. Буженинова д.16, стр. 1

ИНН/КПП 7718175225/771801001

ОГРН 1027700045230 ОКПО 54993724

Тел: +7(495)-963-0013

Факс: +7(495)-964-2266

E-mail: mail@newpiezo.com

www.newpiezo.com

07 ноября 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ОАО «Фомос-Материалс»

В.Б. Васильев

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы А.С. Швецова «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры»

Комиссия в составе заместителя директора Сахарова С.А., Забелина А.Н., Бузанова О.А. составила настоящий акт в том, что выполненные А.С. Швецовым расчеты температурных коэффициентов частоты для различных срезов лангасита, были использованы для предварительного выбора ориентаций подложек из монокристаллов, перспективных для создания датчиков температуры, а расчетные параметры распространения поверхностных акустических волн на этих подложках позволили корректно спроектировать резонаторы, выступающие в качестве чувствительных элементов датчиков, которые испытывались в ОКР, проведенных в рамках участия РФ в Седьмой Европейской Рамочной Программе по теме «Беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах для контроля физических параметров в широком диапазоне температур» Государственный контракт от «12» мая 2009 г. № 02.527.12.0006

Сахаров С.А.

Забелин А.Н.

Бузанов О.А.

Приложение 2. Результаты расчета параметров ПАВ

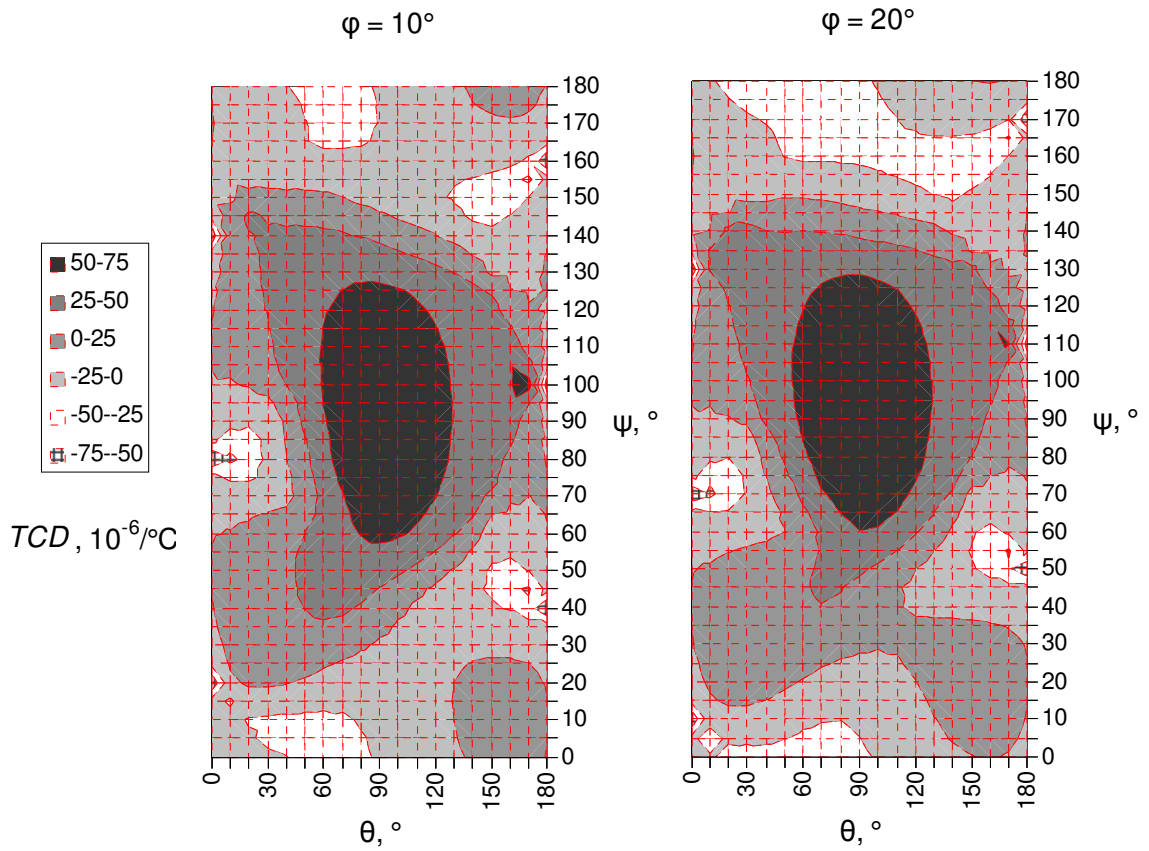


Рис. 52. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 10^\circ$ (слева) и $\varphi = 20^\circ$ (справа)

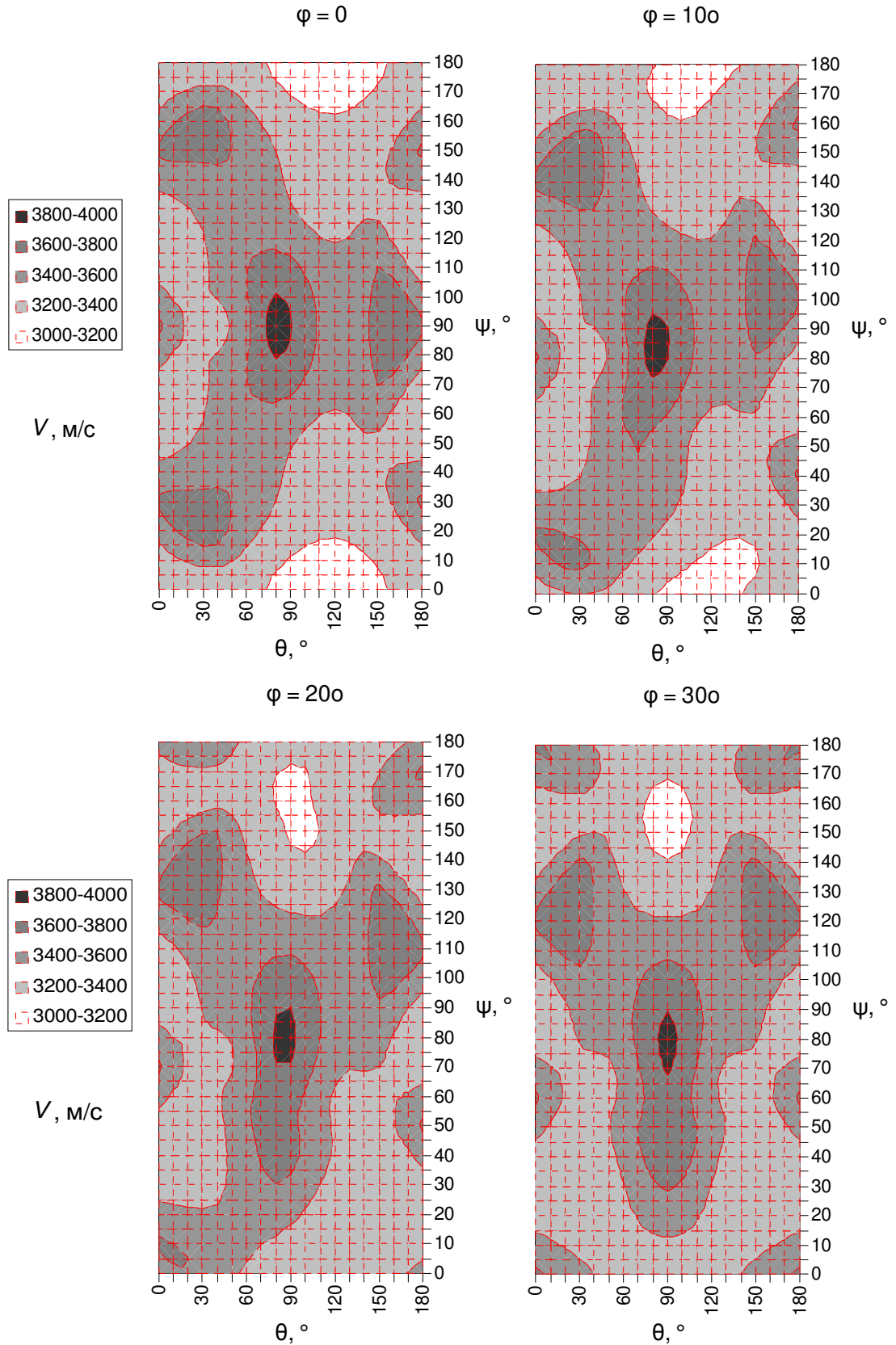


Рис. 53. Зависимость скорости V ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

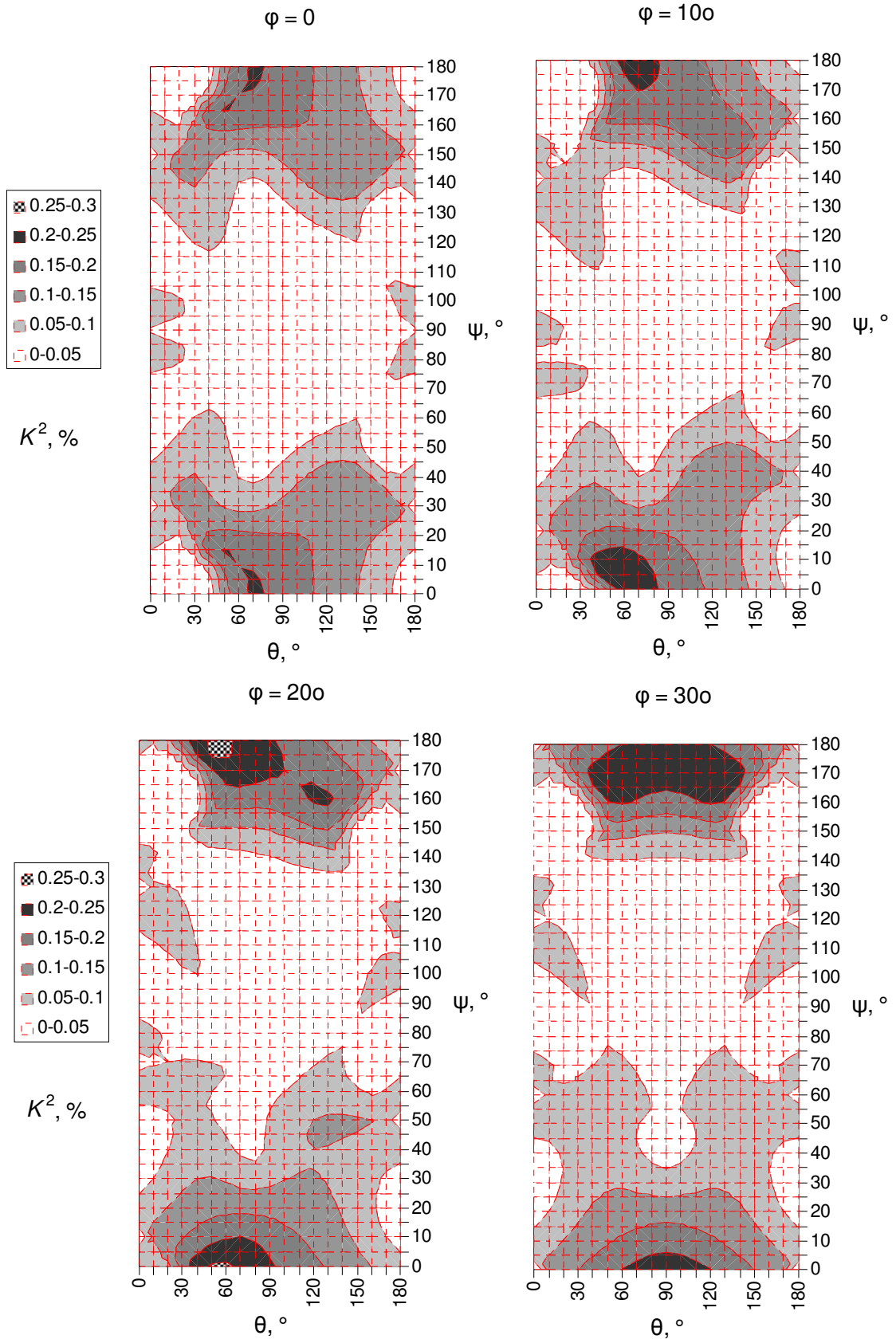


Рис. 54. Зависимость КЭМС K^2 ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0^\circ$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

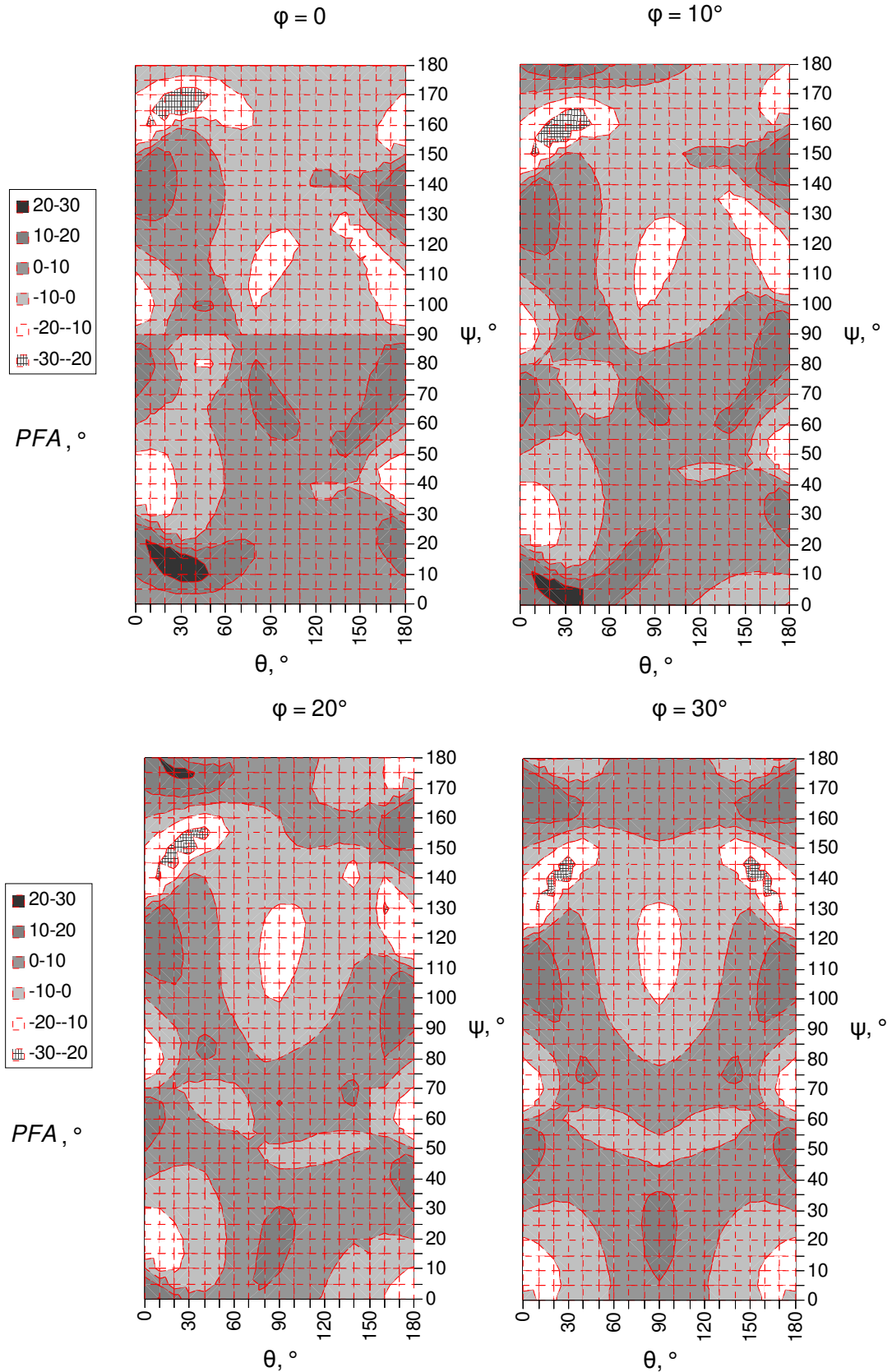


Рис. 55. Зависимость угла отклонения потока энергии PFA ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из кварца от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0^\circ$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

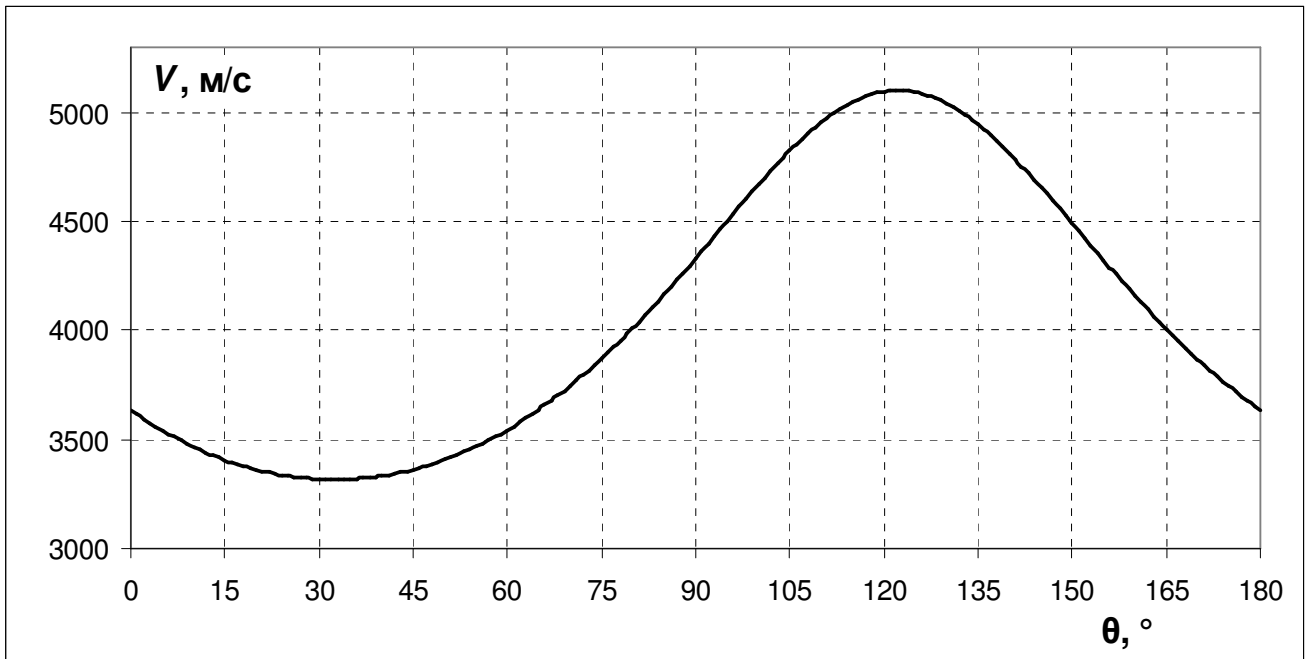


Рис. 56. Зависимость скорости V ВГБ на подложках из кварца (со слоем алюминия толщиной $0,5\%$ от λ) от второго угла Эйлера θ

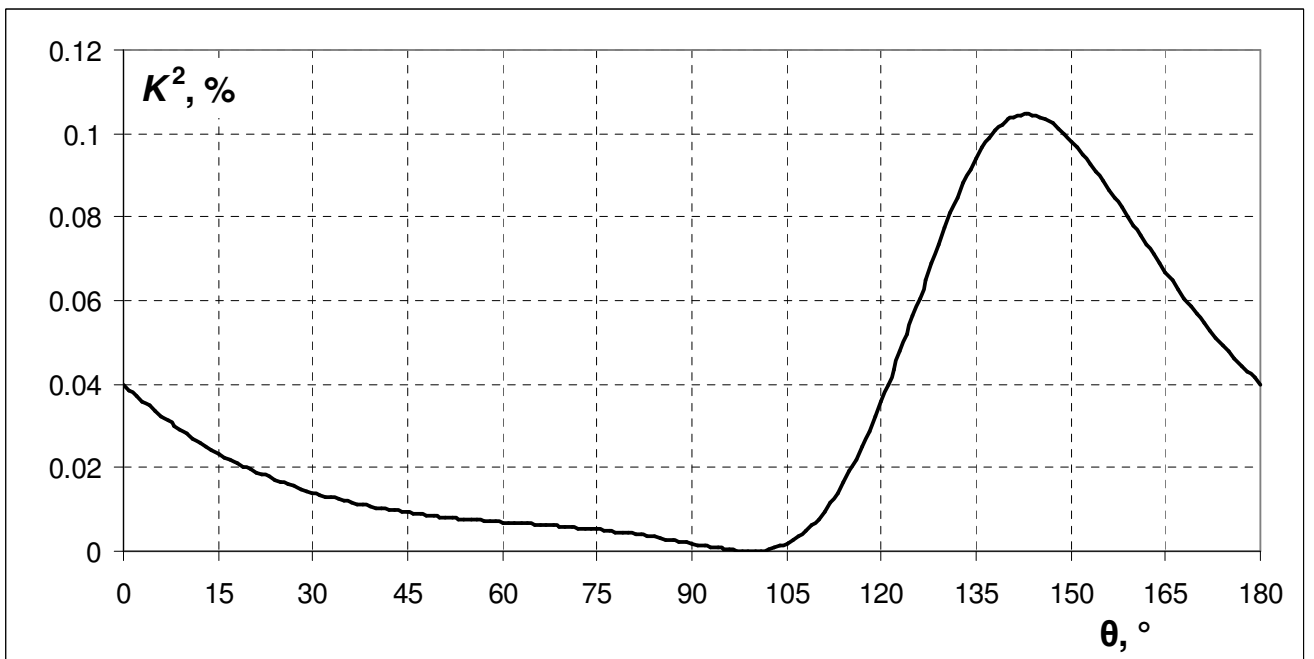


Рис. 57. Зависимость КЭМС K^2 ВГБ на подложках из кварца (со слоем алюминия толщиной $0,5\%$ от λ) от второго угла Эйлера θ

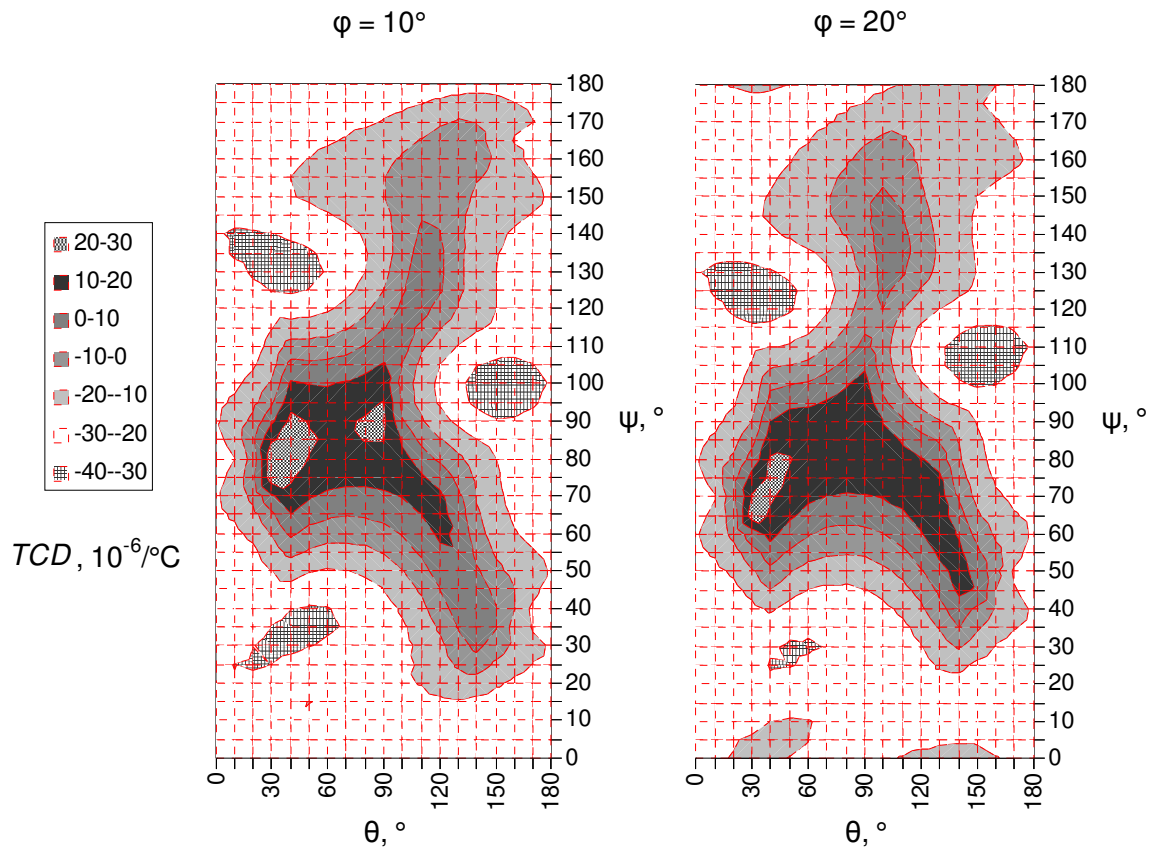


Рис. 58. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из лангасита от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 10^\circ$ (слева) и $\varphi = 20^\circ$ (справа)

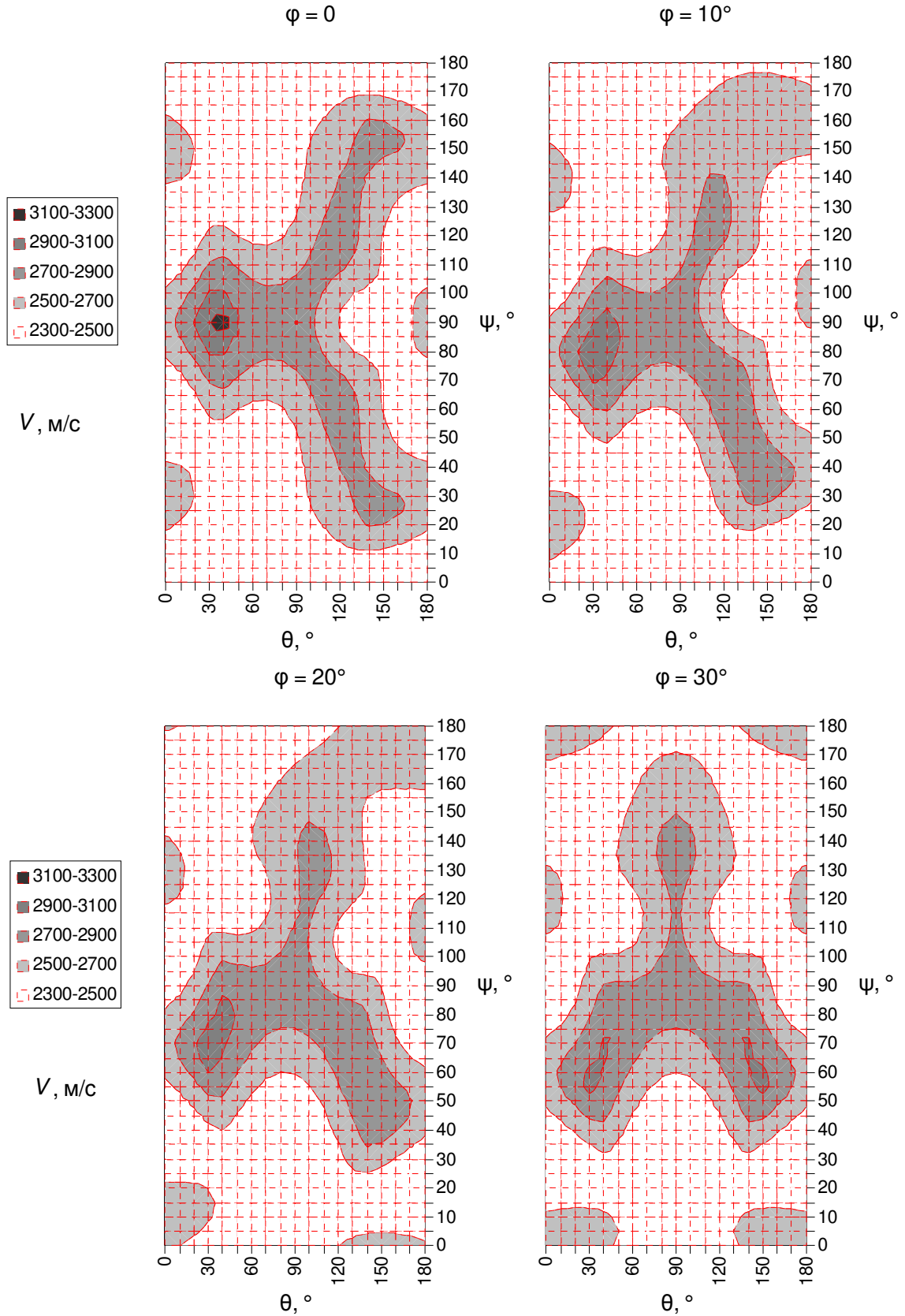


Рис. 59. Зависимость скорости V ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из лангасита от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

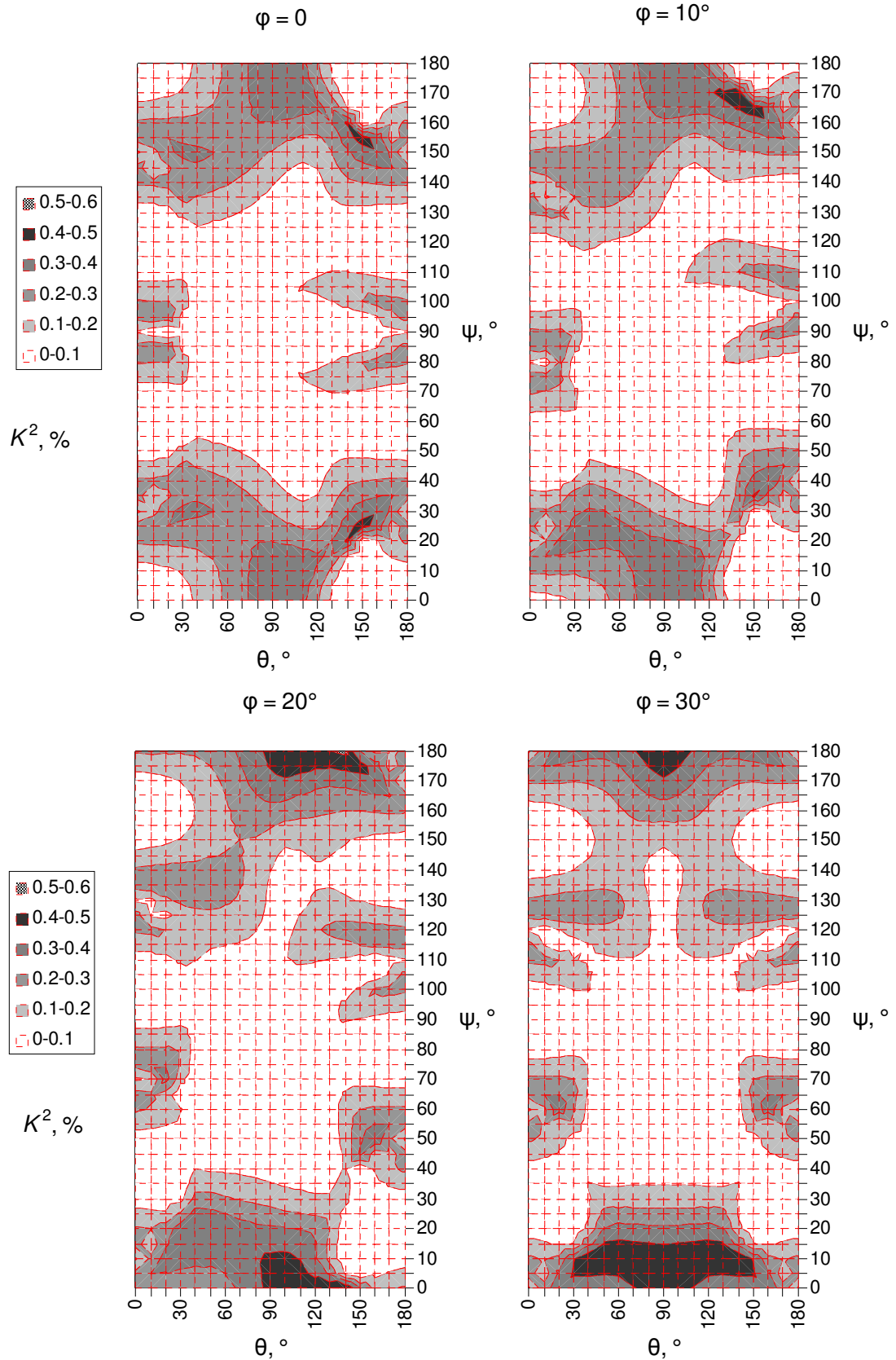


Рис. 60. Зависимость КЭМС K^2 ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из лангасита от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

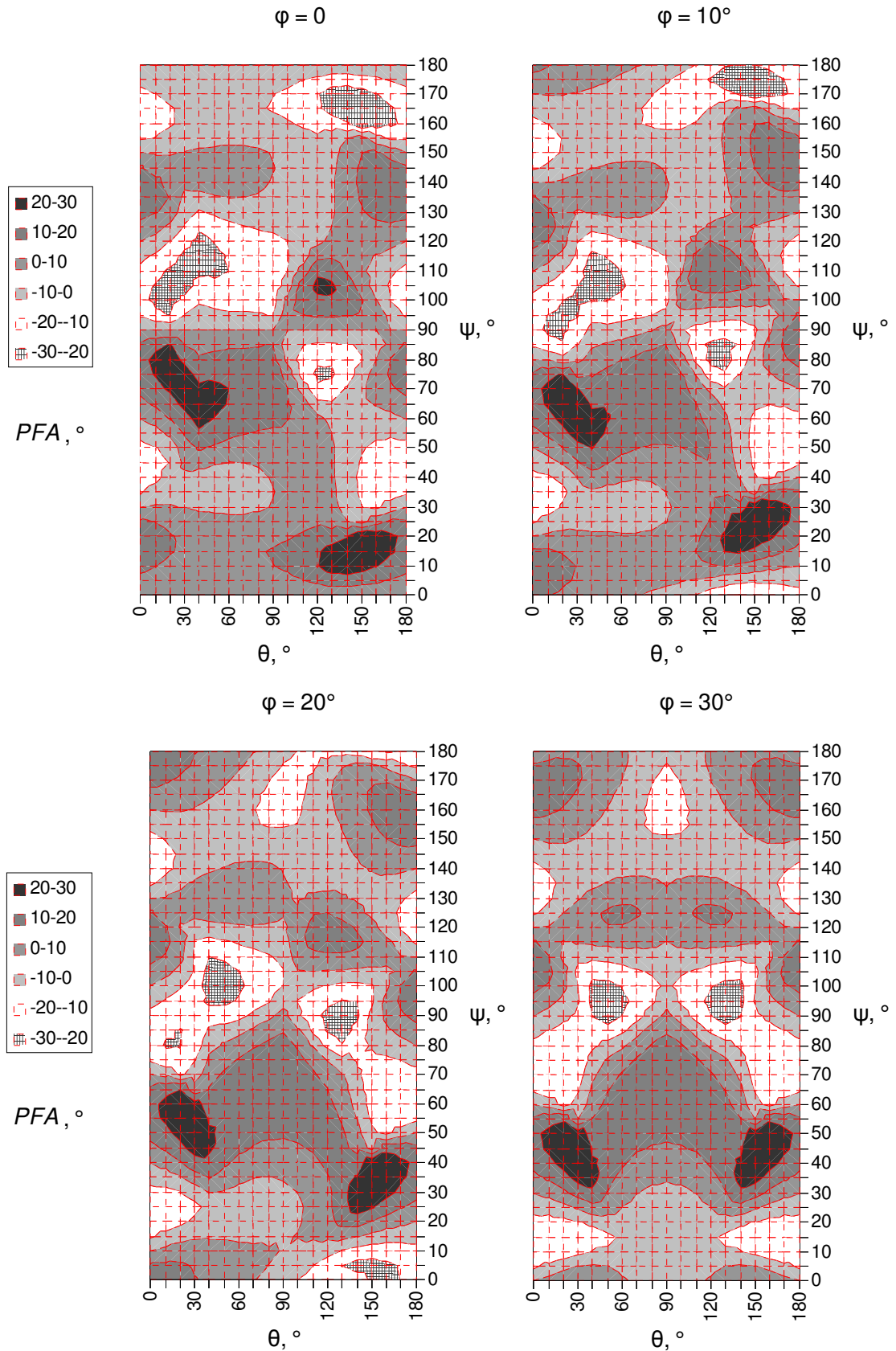


Рис. 61. Зависимость угла отклонения потока энергии PFA ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из лангасита от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

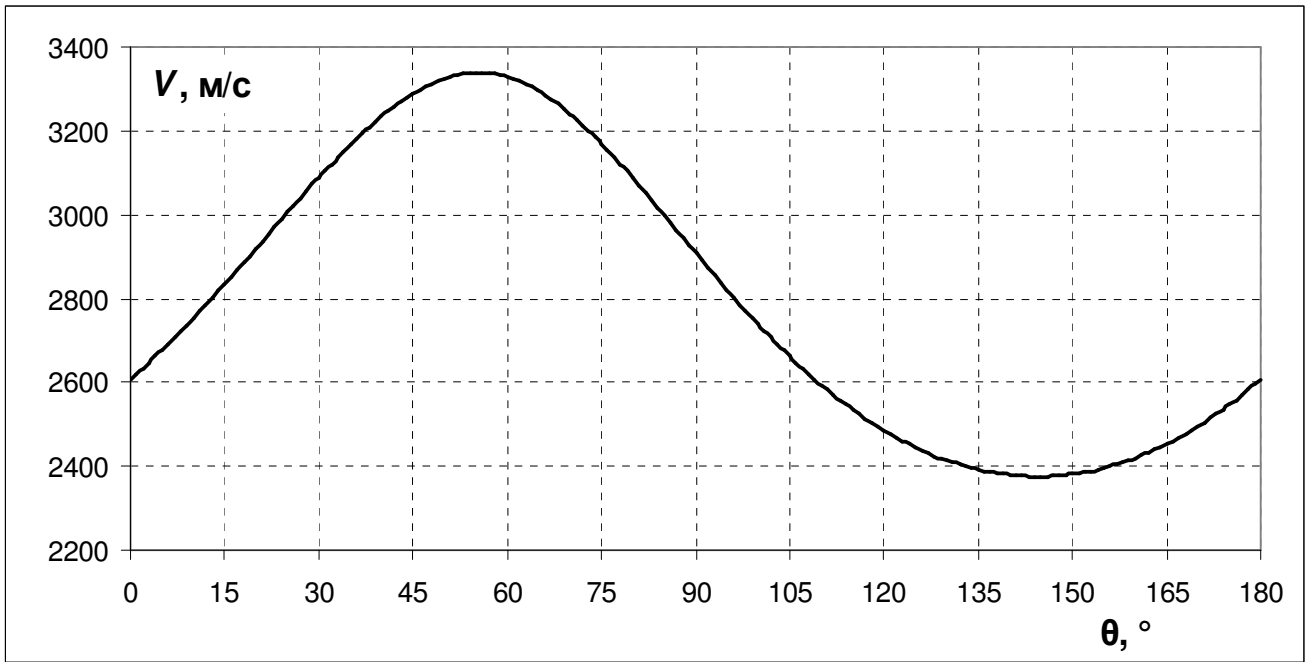


Рис. 62. Зависимость скорости V ВГБ на подложках из лангасита (со свободной поверхностью) от второго угла Эйлера θ

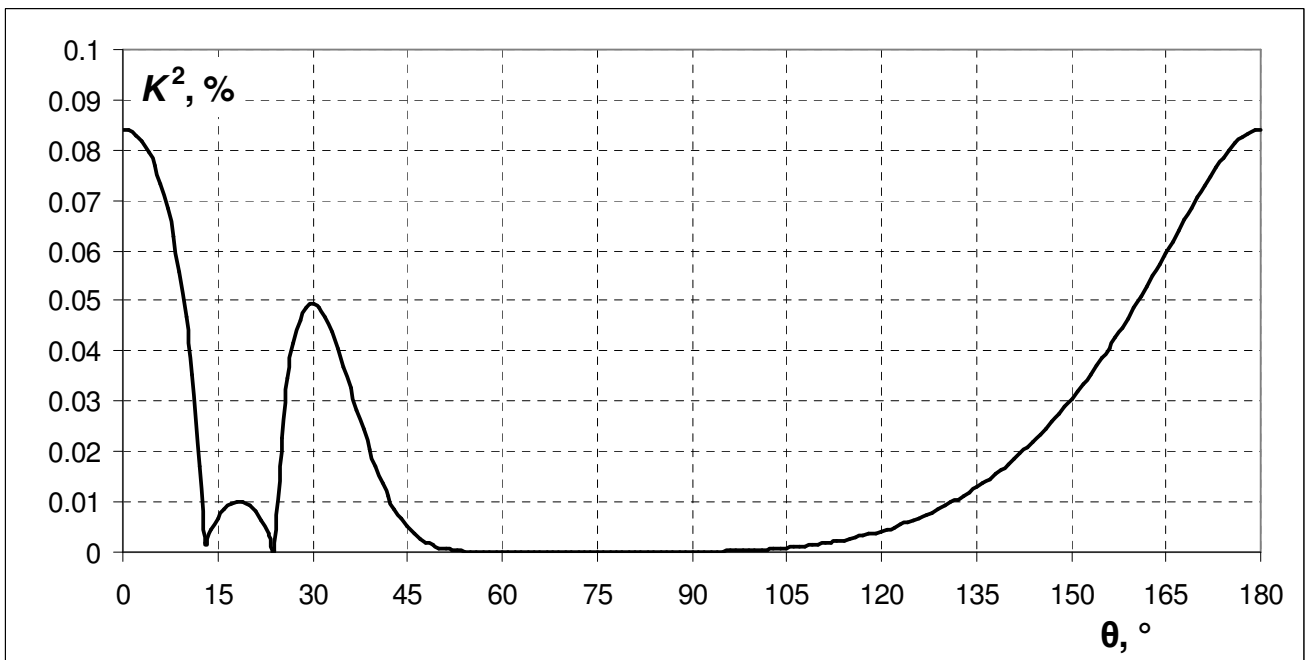


Рис. 63. Зависимость КЭМС K^2 ВГБ на подложках из лангасита (со свободной поверхностью) от второго угла Эйлера θ

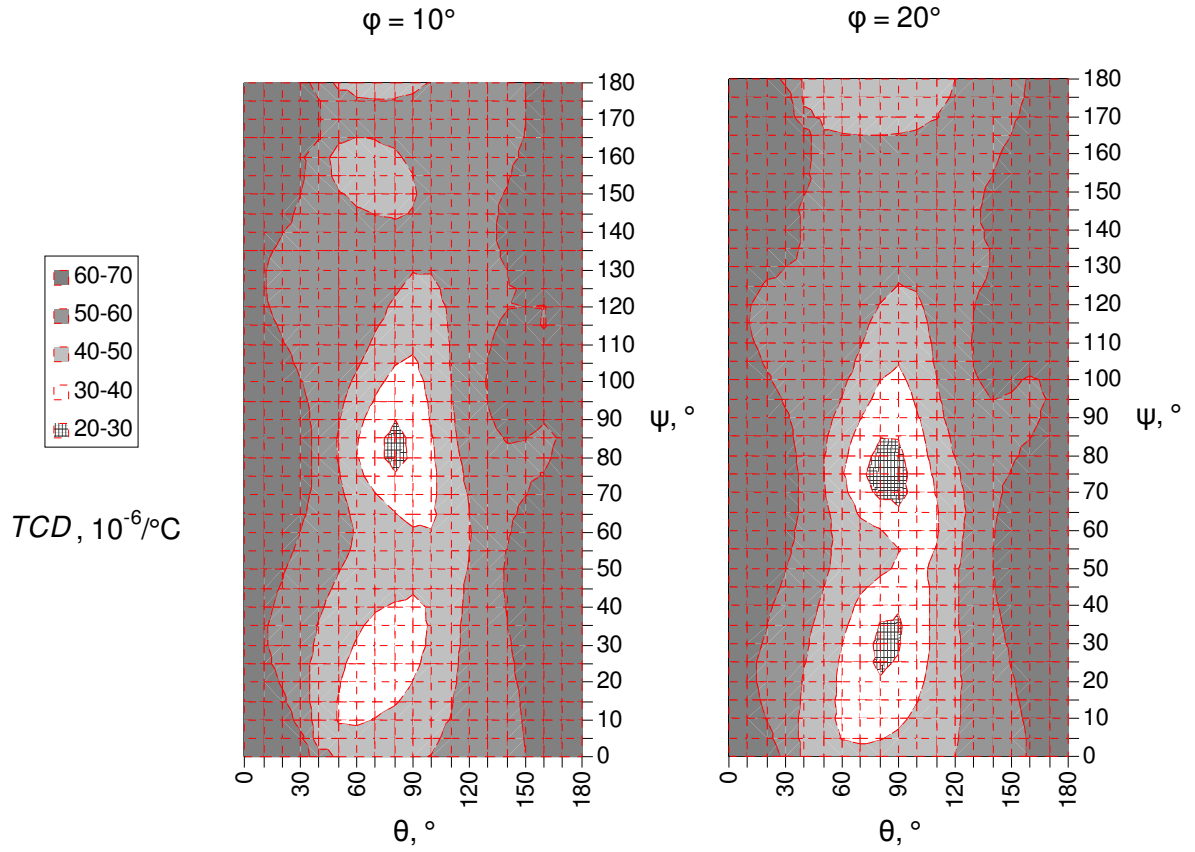


Рис. 64. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из танталата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 10^\circ$ (слева) и $\varphi = 20^\circ$ (справа)

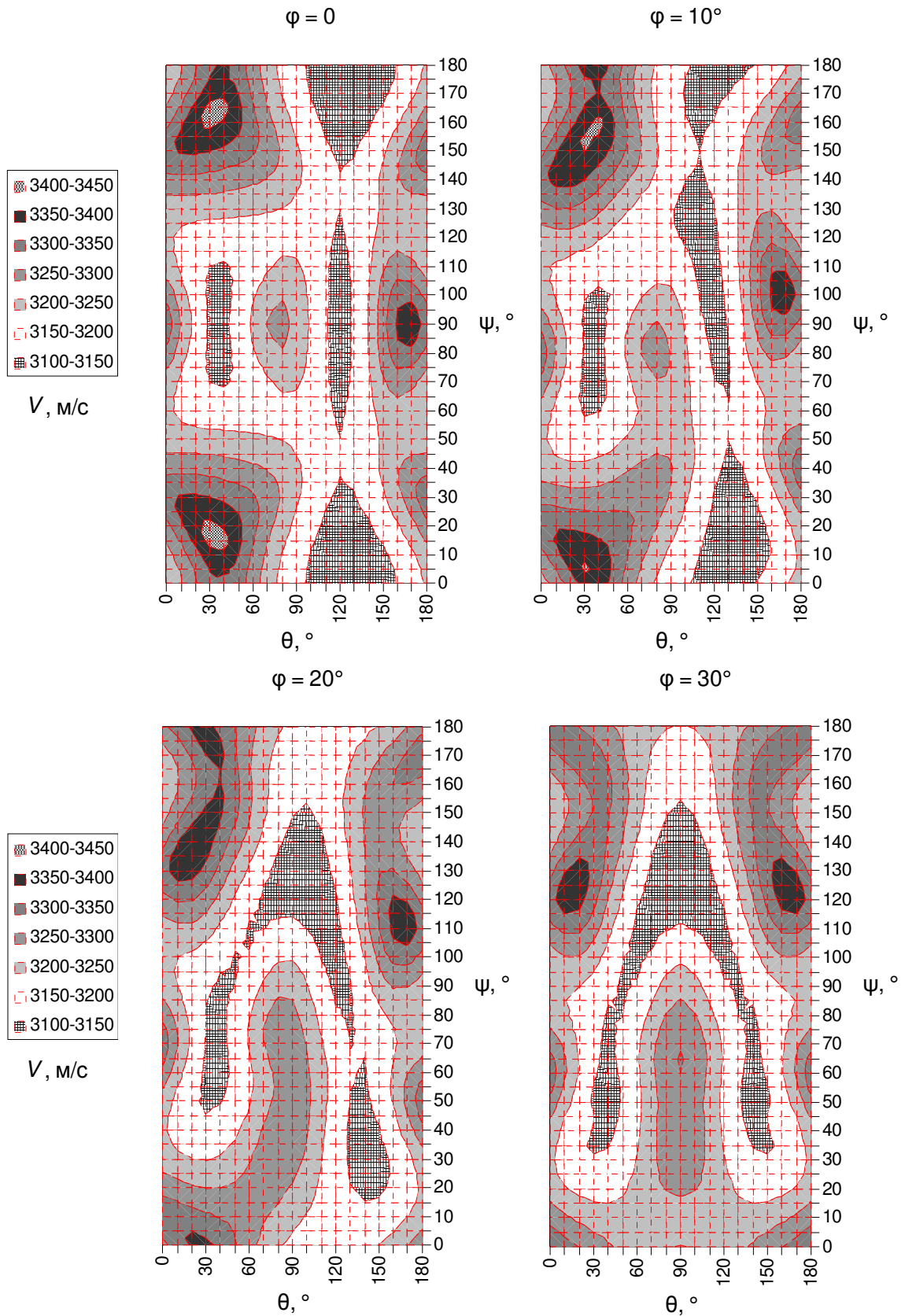


Рис. 65. Зависимость скорости V ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из танталата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

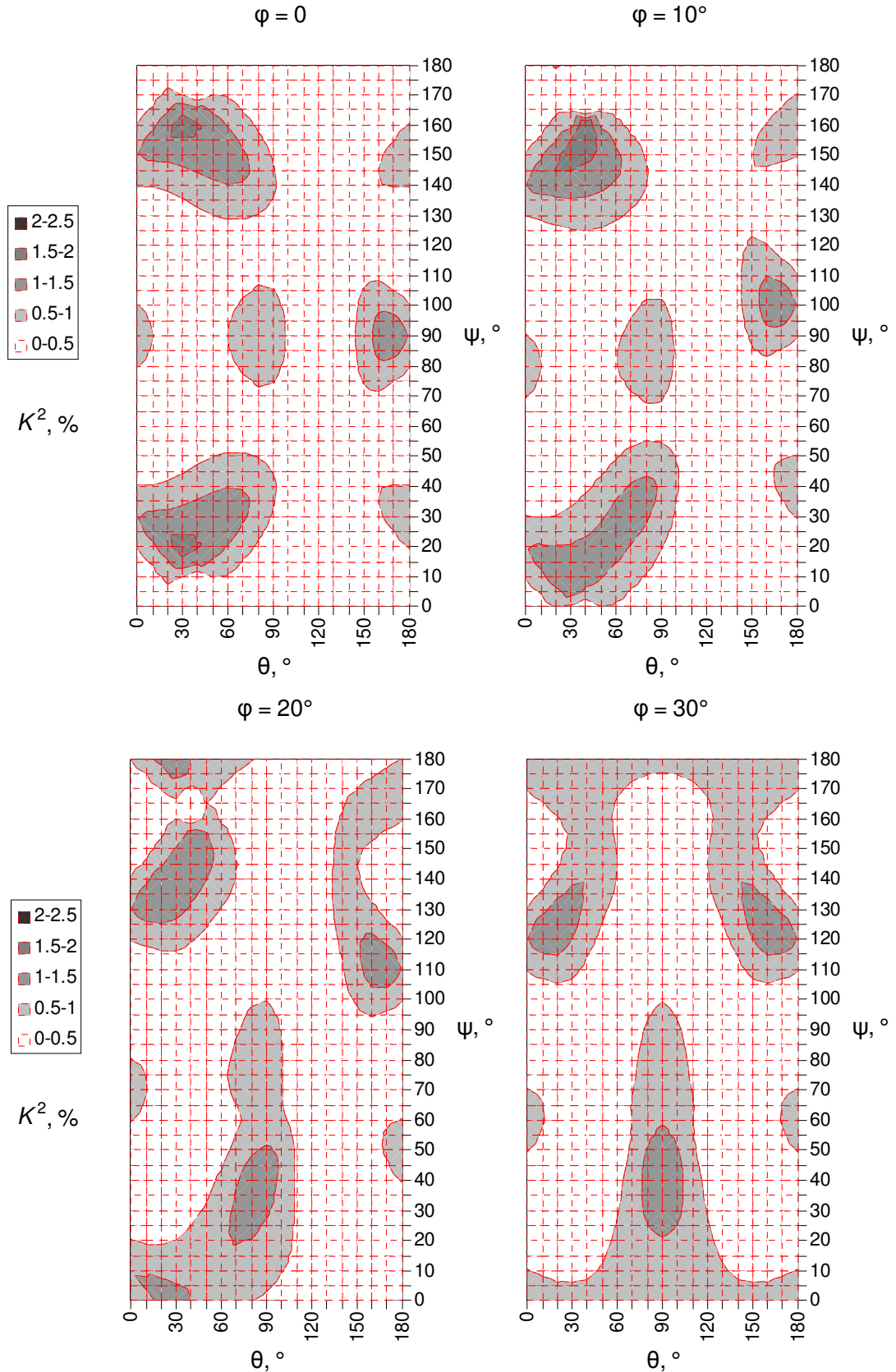


Рис. 66. Зависимость КЭМС K^2 ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из танталата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

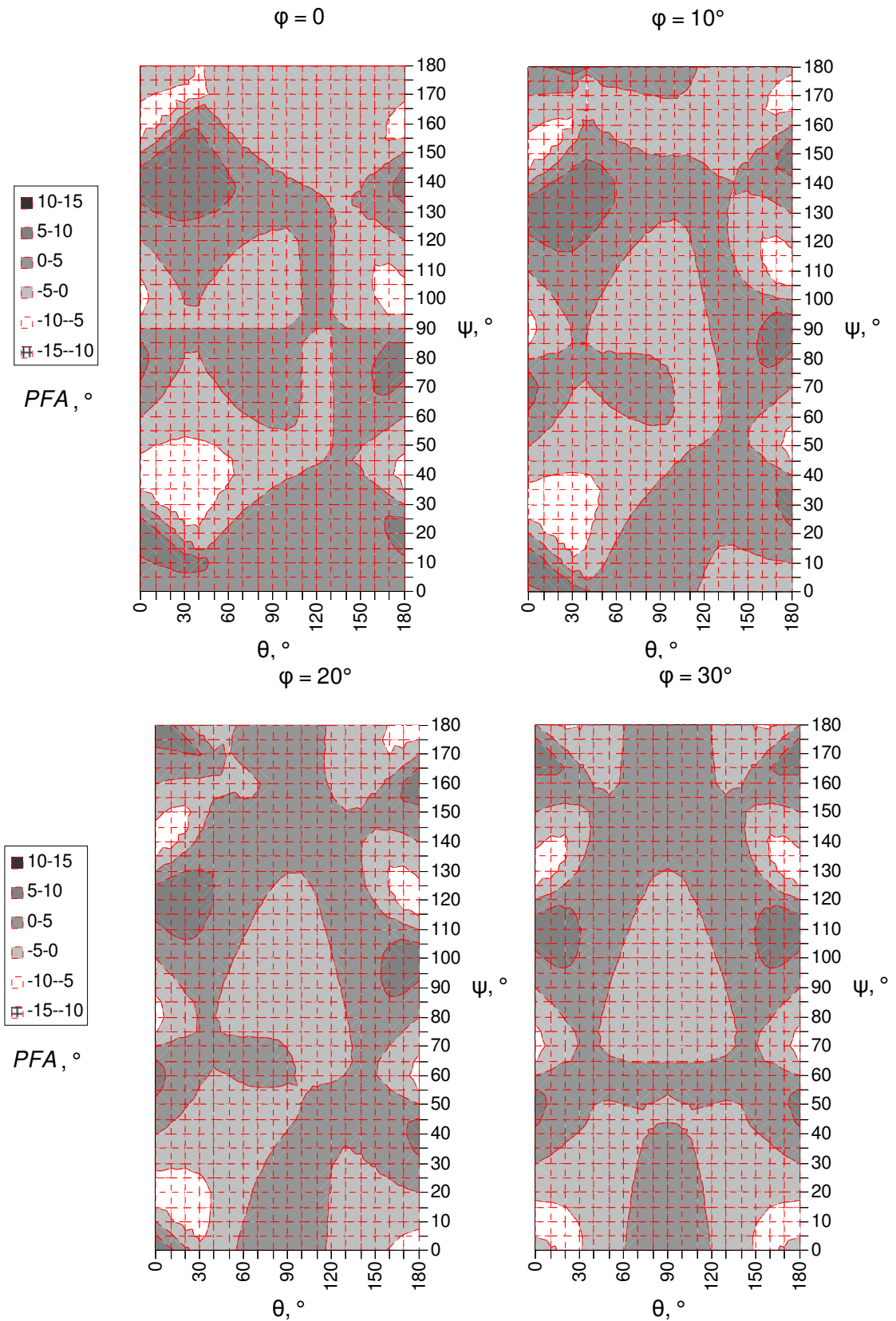


Рис. 67. Зависимость угла отклонения потока энергии *PFA* ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из танталата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

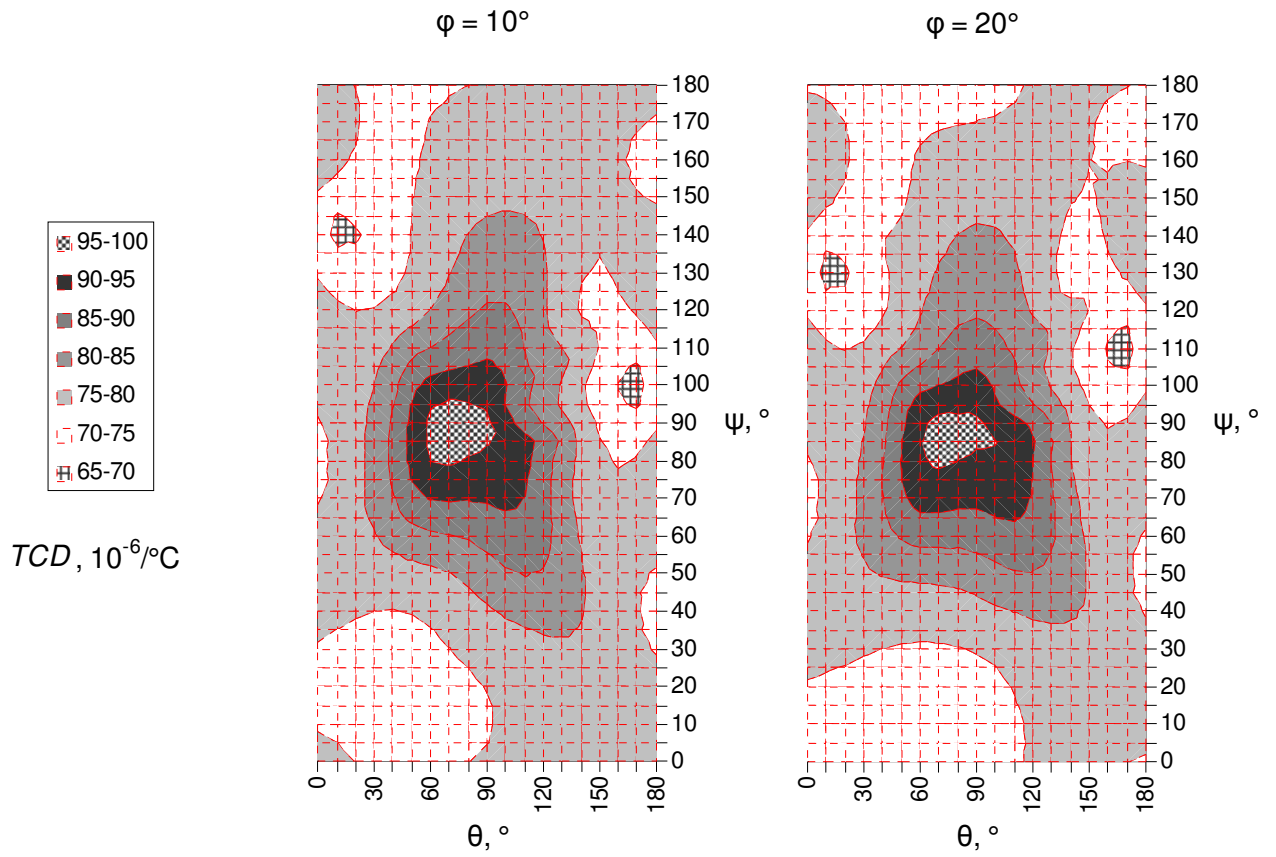


Рис. 68. Зависимость ТКЗ TCD ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 10^\circ$ (слева) и $\varphi = 20^\circ$ (справа)

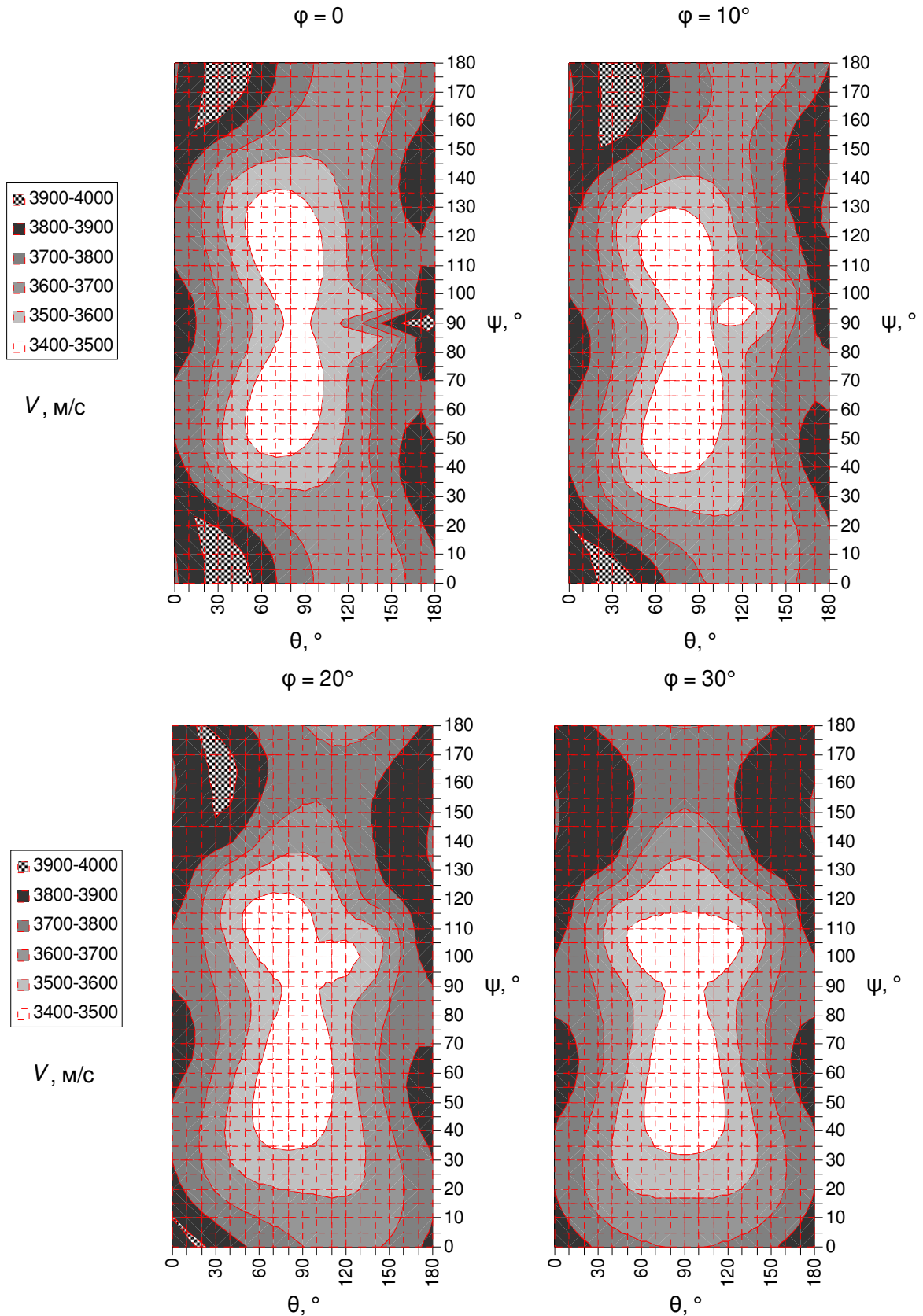


Рис. 69. Зависимость скорости V ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

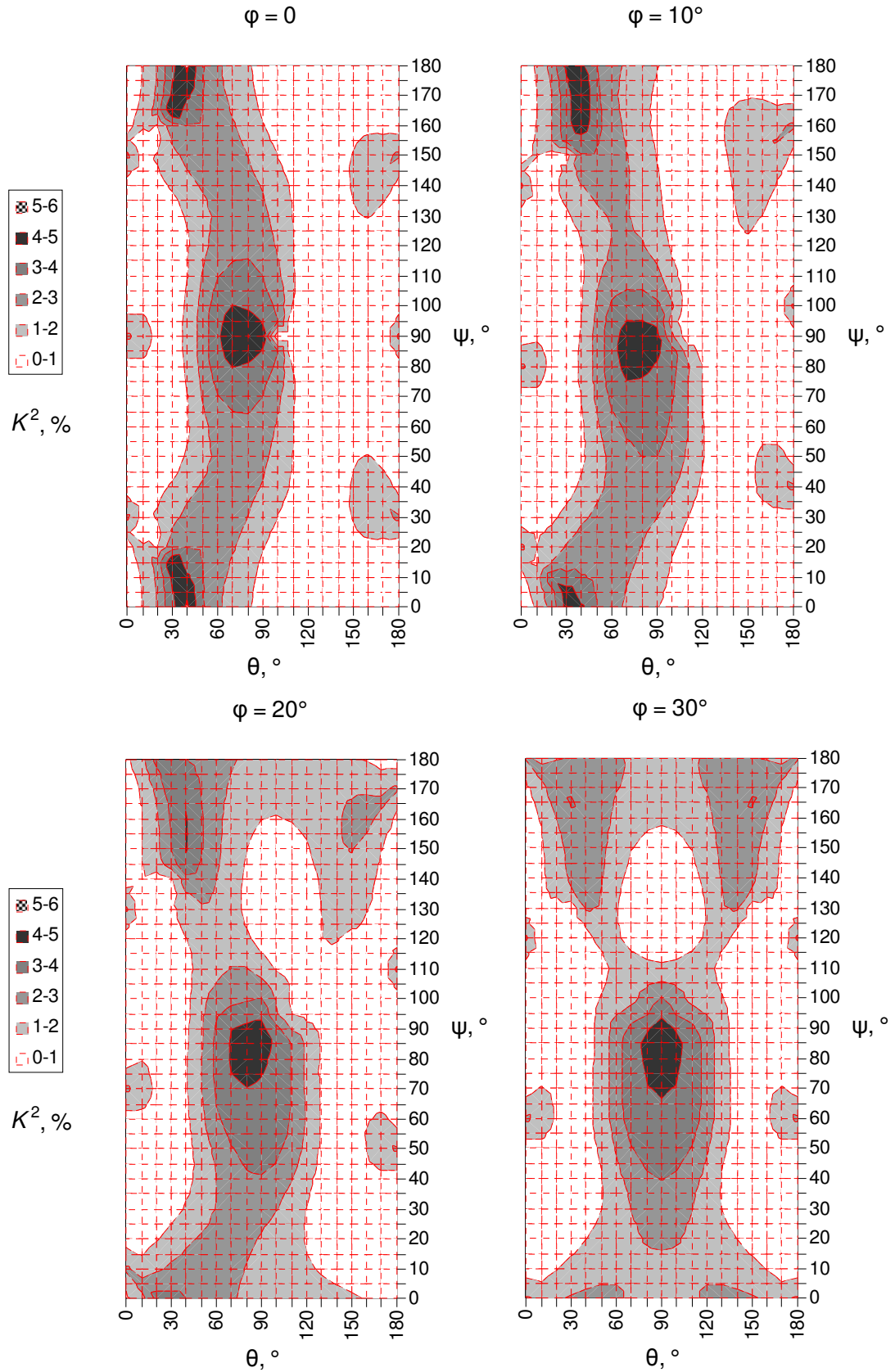


Рис. 70. Зависимость КЭМС K^2 ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\varphi = 0$ (сверху слева), $\varphi = 10^\circ$ (сверху справа), $\varphi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\varphi = 30^\circ$ (снизу справа)

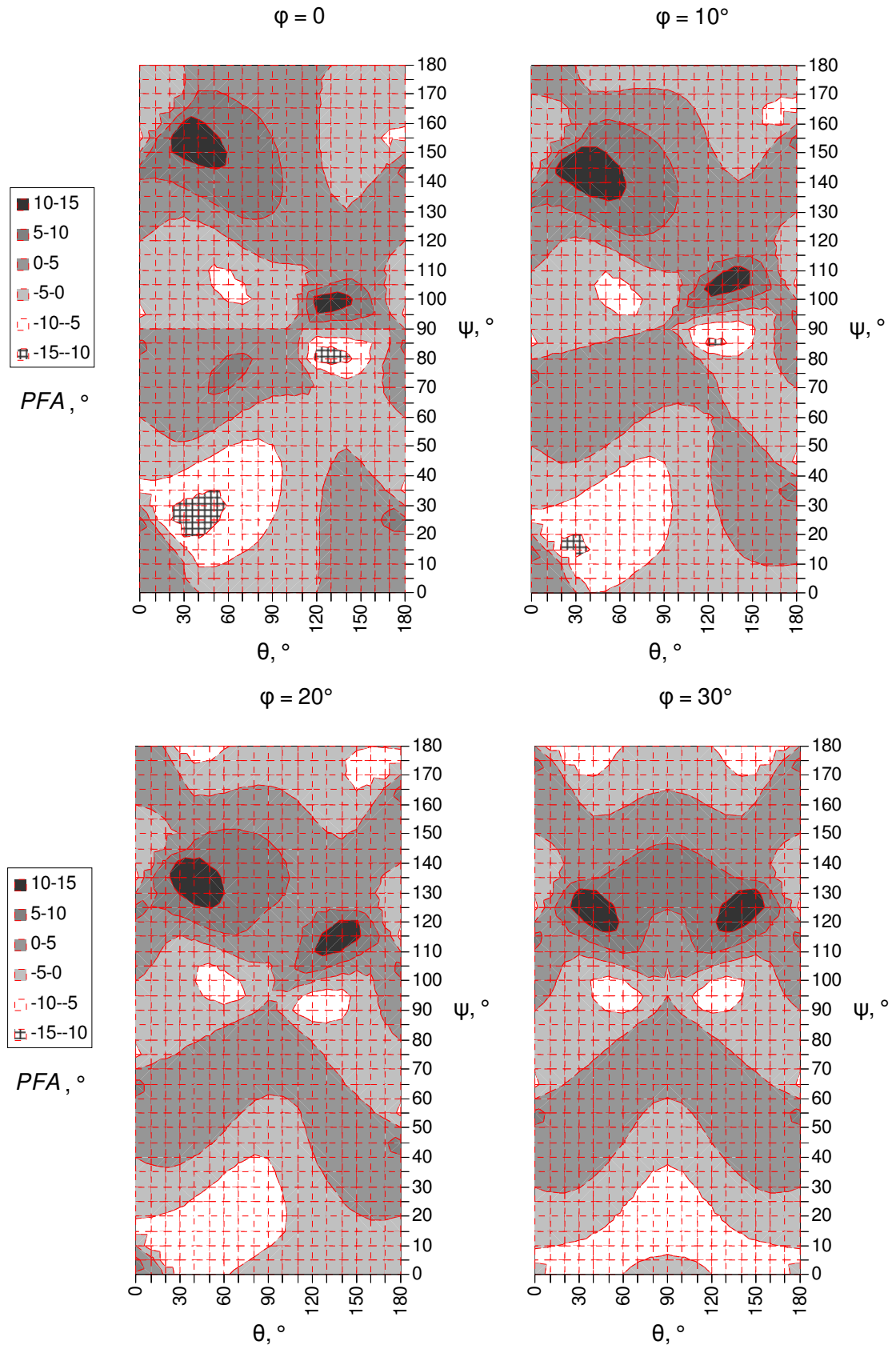


Рис. 71. Зависимость угла отклонения потока энергии PFA ПАВ с наименьшей скоростью на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированных значениях первого угла Эйлера $\phi = 0$ (сверху слева), $\phi = 10^\circ$ (сверху справа), $\phi = 20^\circ$ (снизу слева) и $\phi = 30^\circ$ (снизу справа)

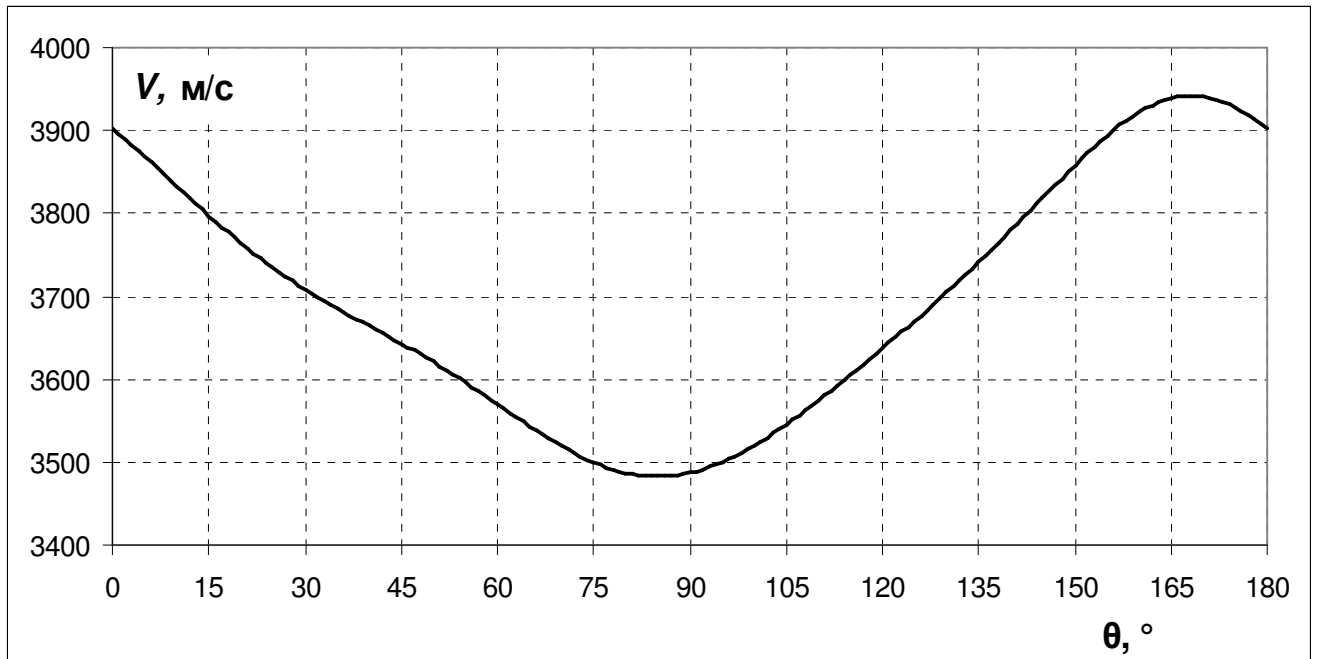


Рис. 72. Зависимость скорости V ПВР на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ

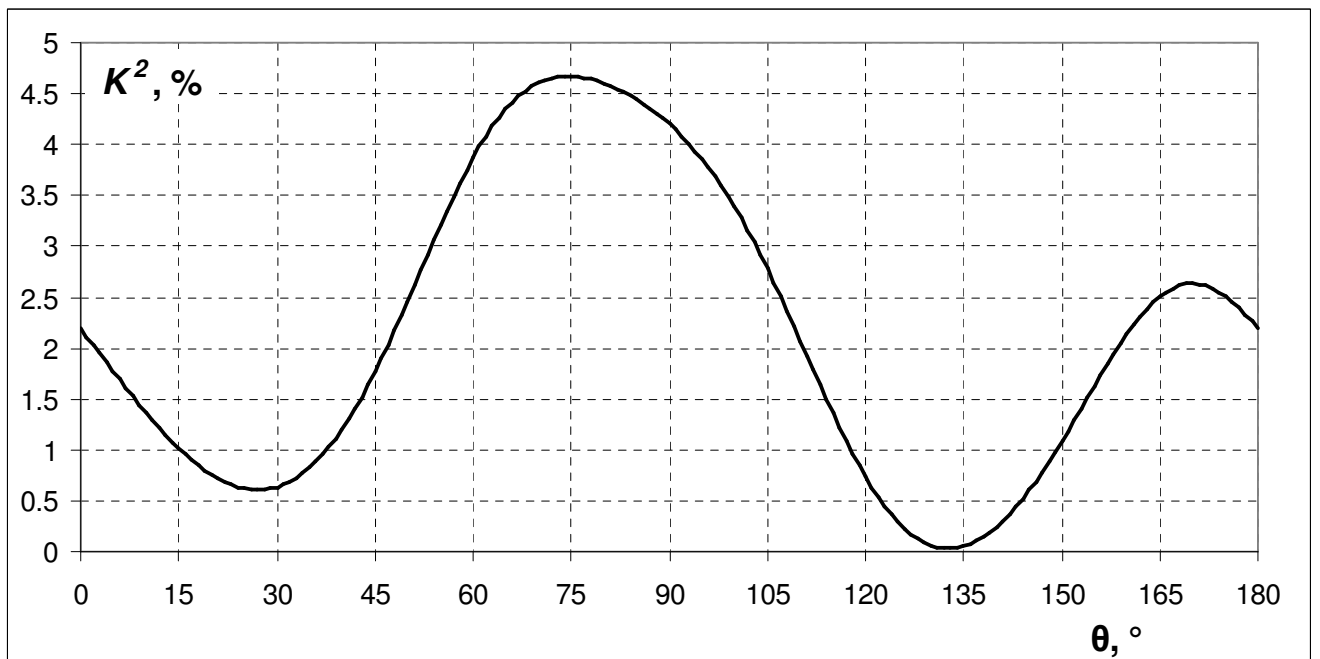


Рис. 73. Зависимость КЭМС K^2 ПВР на подложках из ниобата лития от второго угла Эйлера θ